



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INGENIERÍA GEOFÍSICA

**ESTUDIO GRAVIMÉTRICO DEL SECTOR SUR  
DEL CRÁTER CHICXULUB, YUCATÁN, MÉXICO – ANÁLISIS  
DE POSIBLES TRAYECTORIAS DE IMPACTO  
Y ESTRUCTURAS PRE-EXISTENTES**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO GEOFÍSICO**

P R E S E N T A

**IRVING ALEXANDER ROMERO GALINDO**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI**



MÉXICO D.F., 2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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

Estoy profundamente agradecido con mi madre Lucila Galindo y mi padre Ricardo Romero, que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Por creer en mí, aunque hemos pasado por momentos difíciles siempre han estado apoyándome en todo y dándome su amor, por todas esas veces que han estado escuchándome y por tenerme tanta paciencia, sé que no es fácil expresarlo con palabras, pero le doy gracias a Dios por darles fuerza y que aun estén conmigo. Los quiero con todo el corazón y lo saben, con este trabajo que hice y con el cual termino una etapa más de mi vida, lo realicé pensando en la satisfacción tanto para mis padres como para mí y es para ellos.

A mis hermanos y colegas, Ricardo y Jonathan, gracias por ser una parte esencial de mi vida, gracias a ustedes he aprendido muchas cosas, gracias por estar conmigo, amigos y compañeros de la vida y de la facultad, a quienes también les agradezco formar parte de mi vida y me han sabido encaminar, gracias por los momentos de felicidad y por ser aliados de mis tristezas y alegrías, gracias por ayudarme en cada uno de mis tropiezos, gracias por ser parte de mi.

A mis lindos y siempre sonrientes sobrinos, Yazmín Michelle y Ricardo Frans Benjamin, sé que ahora no saben leer aunque pronto lo harán, quiero que sepan que ustedes también forman parte de mí y quiero que sepan que hoy escribiendo esto, los quiero, nunca los voy a dejar solos y siempre contarán conmigo.

A toda mi familia, aunque no siempre estuvieron a mi lado, estuvieron siempre en mi pensamiento, les agradezco por ser parte esencial de mis padres y hermanos, a mis cuñadas Tania Contreras y Stephanie Coomans, por ser parte de esta familia.

A todos mis amigos, sin excluir a alguno, Alberto, Edgar, Esteban, Porfirio, José Ángel, Richard, Carlos, Ángel, Eder, Alfredo, Martín, Miguel, Ricardo, Daniel, Enrique, Darío, Isaí, Raúl, Sergio, Johana, Yusura, Nancy, Carolina, Jenifer, Richi, Kampa, Andrés, Cinthia, Coppelia, Daniela, Edith, Elizabeth, Elías, Iván, Jesús, Candy, Mario, Marco, Melisa, Miros, Mitzi, Nicolás, René, Silvia, Tania, Venancio, Vianey, Yvette, Yazmín; muchas gracias por ser mis amigos incondicionales, gracias por estar conmigo en las buenas y malas, por haber vivido momentos felices y llenos de locuras, gracias por ser como son y recuerden que siempre los llevaré en mi corazón.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi director de tesis, Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi quien es líder mundial del proyecto del cráter Chicxulub, un ejemplo de constancia, paciencia y profesionalismo, le agradezco toda su paciencia y apoyo, como olvidar esas platicas tan educativas.

A todos mis profesores por haberme brindado su conocimiento, espero volver a verlos y tener la dicha de trabajar con ustedes.

Al Dr. Juan Carlos Mora Chaparro y al Dr. Jesús Castro, por haberme apoyado en mi servicio social, ser profesores y amigos, gracias por ser las personas que son, aprendí mucho de ustedes y les guardo un gran cariño, gracias por escucharme, tenerme paciencia y el apoyo.

A las Doctoras, Doctores y Maestras del Instituto de Investigaciones Económicas, Mtra. Patricia Rodríguez, Dra. Eugenia Correa, Dr. Alejandro López, Dr. Alicia Girón, Dr. Alejandra, a la Lic. Mirosalba y a mis compañeros de trabajo, Ricardo, Laura, Juan Carlos, Abraham, Carlos, Montse; por ser las personas que son, por ser un gran equipo y por ser excelentes estudiantes y compañeros.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por haberme brindado las puertas del conocimiento y ser parte de ella.

*“He sido tentado por dejar volar mis sueños, sin embargo, he tenido la fuerza de vencer el miedo a caer y sostenerme de los cimientos que he construido”.*

**Irving Alexander Romero Galindo**

*“La disciplina es la parte más importante del éxito”.*

**Truman capote**

*“Dadas las circunstancias adecuadas, sin más base que los sueños, la determinación y la libertad de intentarlo, personas muy corrientes hacen constantemente cosas extraordinarias”.*

**Dee Ward Hock**

*“Cuanto más alto estemos situados, más sencillos debemos ser”.*

**Marco Tulio Cicerón**

<b>RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
HIPÓTESIS DEL IMPACTO	11
EFFECTOS EN LA ATMÓSFERA Y LA EXTINCIÓN DE ORGANISMOS	12
DIMENSIONES DEL CRÁTER	13
DESCRIPCIÓN DE LA ANOMALÍA	15
ESTUDIOS GEOFÍSICOS	18
OBJETIVOS	24
HIPÓTESIS	25
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MODELOS GEOFÍSICOS</b>	<b>26</b>
MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS	27
<i>Corrección por latitud</i>	28
<i>Corrección por Aire Libre</i>	29
<i>Corrección de Bouguer</i>	29
<i>Corrección por Terreno</i>	30
<i>Corrección por marea de la Tierra</i>	30
<i>Isostasia y la corrección isostática</i>	31
<i>Anomalía gravimétrica de Bouguer</i>	32
<i>Densidad de las rocas</i>	33
BASE DE REFERENCIA EN ESTUDIOS GRAVIMÉTRICOS REGIONALES	35
LITOLOGÍA Y ESTRUCTURA DEL CRÁTER DE CHICXULUB	36
FORMACIÓN, DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DEL CRÁTER DE CHICXULUB	37
<i>Cráter de Impacto Chicxulub</i>	39
<i>Modelos Geofísicos</i>	42
<i>Programas de Perforación</i>	47
<i>Petrografía y Geoquímica</i>	51
<i>Estratigrafía y la Edad del Impacto</i>	53
IMPACTOS OBLICUOS	61
<i>Distribución del nivel de impacto</i>	62
<i>Dirección y ángulo de impacto</i>	63
<i>Escala del tamaño del cráter</i>	64
<i>Formación y definición del tamaño del cráter</i>	65
<i>El efecto del ángulo de impacto en objetivos hidrodinámicos</i>	68

### **CAPÍTULO III**

<b>MÉTODOS</b> -----	<b>71</b>
MÉTODOS Y TEORÍAS APLICABLES -----	72
<i>Tablas de Rocas Sedimentarias</i> -----	73
<i>Perforación de Pozos</i> -----	74
<i>Corrección de Bouguer</i> -----	77
<i>Gradiente Horizontal y Gradiente Vertical</i> -----	78
<i>Continuación Arriba y Abajo</i> -----	78
<i>Transformada de Fourier</i> -----	79
<i>Espectro de Potencia</i> -----	79
<i>Cálculo de las Pendientes</i> -----	79
<i>Modelado Gravimétrico</i> -----	79

### **CAPÍTULO IV**

<b>ANÁLISIS GEOFÍSICO</b> -----	<b>80</b>
ADQUISICIÓN -----	81
PROCESAMIENTO -----	84
INTERPRETACIÓN -----	114

### **CAPÍTULO V**

<b>DISCUSIÓN</b> -----	<b>124</b>
POSIBLES TRAYECTORIAS DE IMPACTO -----	125
ESTRUCTURAS PRE-EXISTENTES -----	135
<b>CONCLUSIONES</b>	
POSIBLES TRAYECTORIAS DE IMPACTO -----	139
ESTRUCTURAS PRE-EXISTENTES -----	141

<b>ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS</b> -----	<b>143</b>
---	------------

<b>BIBLIOGRAFÍA</b> -----	<b>146</b>
---------------------------	------------

# Resumen

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se presentan los resultados para el análisis de posibles trayectorias de impacto y el modelado gravimétrico de estructuras pre-existentes en la zona sur del cráter de Chicxulub.

Analizando las posibles trayectorias de impacto en el cráter de Chicxulub, autores como P. Claeys, W. Kiessling, Pierazzo, H. Melosh, Schultz, D'Hondt, Ekholm, Gulick y Barton comparten la idea de un impacto oblicuo, con una dirección hacia el noroeste (NW), el cual estaría relacionado con un ángulo de impacto estimado entre los 15° y 45°, esto debido a la dirección y al abundante material eyectado a la atmosfera para producir dicho cambio dramático del clima de la Tierra y demás efectos consecuentes.

Se realizaron modelos gravimétricos de la zona sur del cráter de Chicxulub, con la finalidad de explicar estructuras pre-existentes, las cuales fueron modificadas por el impacto del meteorito.

Se sugirieron modelos del tipo sutura-falla-cuenca, para la explicación del posible origen de estas estructuras. Estos modelos sugieren una zona de sutura, la cual tiene una estructura profunda estimada en  $24.665 \pm 0.795$  kilómetros, posteriormente se generó la falla geológica de Ticul que se pudo haber reactivado, la cual permitió el origen de una cuenca y que fue sepultada por la sedimentación. Sin embargo, el estudio de la falla de Ticul requiere de mayor análisis y estudios estructurales a detalle.

La anomalía en la zona sur del cráter de Chicxulub, tiene una orientación norte-sur y se caracteriza por su forma alargada, la cual se encuentra dividida por la estructura del cráter de Chicxulub.

## ABSTRACT

In this research work presents the results for the analysis of possible trajectories of impact and gravity modeling of pre-existing structures in the southern Chicxulub crater.

Analyzing the possible trajectories of impact on the Chicxulub crater, authors such as P. Claeys, W. Kiessling, Pierazzo, H. Melosh, Schultz, D'Hondt, Ekholm, Gulick and Barton share the idea of an oblique impact, with a direction toward the northwest (NW), which would be associated with an estimated impact angle between 15 ° and 45 °, this because of the direction and the wealth of material ejected into the atmosphere to produce such dramatic change Earth's climate and other consequential effects.

Gravity models were made in the south of the Chicxulub crater, in order to explain pre-existing structures, which were modified by meteorite impact.

Models of the kind have been suggested suture-fault-basin, to explain the possible origin of these structures. These models suggest a suture zone, which has a deep structure estimated at  $24,665 \pm 0,795$  kilometers later was generated Ticul geological fault that may have been reactivated, which allowed the source of a basin and was buried by the sedimentation . However, the study of the failure of Ticul requires additional analysis and structural studies in detail.

The anomaly in the southern Chicxulub crater has a north-south orientation and is characterized by its elongated shape, which is divided by the structure of the Chicxulub crater.

# **Capítulo I**

## **Introducción**

## INTRODUCCIÓN

Desde el siglo XVI era conocida la gran cantidad de cráteres en la superficie de la Luna, aún sin conocer las causas de su formación, ya que estos pudieron haber sido provocados por posibles impactos de meteoritos o por actividad volcánica.

Recientemente, los estudios empleando observaciones satelitales y en muestras colectadas en las misiones Apollo y Luna han demostrado que el origen de los impactos lunares es ocasionado por impactos que datan de 4.5 y los 3.8 mil millones de años, cuando ocurrió un intenso bombardeo de meteoritos.

El proceso de impactos entre cuerpos del sistema solar es importante para entender el origen del sistema solar, los planetas y los satélites. Entre los resultados, se tiene el origen de la Luna, en la teoría del gran impacto, que propone un impacto de un cuerpo del tamaño de Marte (la mitad del radio terrestre y un décimo de su masa) sobre la Tierra cuando estaba a un 90% de su tamaño actual. Este impacto habría expulsado grandes cantidades de material caliente alrededor de la órbita terrestre y la Luna se habría formado a través de la acumulación de este material.

En el sector noroeste NW de la península de Yucatán, mediante estudios de exploración geofísica, geología y de perforación de pozos se ha logrado documentar la presencia de un cráter de grandes dimensiones llamado el cráter de Chicxulub. Los efectos del impacto se han propuesto como la causa probable de la extinción en masa del periodo Cretácico-Paleógeno (K-Pg) que data de hace 65 millones de años. Las huellas de la mayoría de estos cráteres en la tierra han sido borradas por diferentes procesos que modifican continuamente la superficie.

Para explicar la desaparición de los dinosaurios se propuso una teoría en 1980, que sugiere la extinción que se debió a los efectos de la colisión de un bólido de grandes dimensiones (alrededor de unos 10 kilómetros de diámetro) en la superficie terrestre. Esto llevó a que muchos investigadores analizarán esta teoría, con esto surgió la búsqueda del cráter formado por el impacto (Alvarez, Alvarez et al. 1980).

El cráter de Chicxulub que significa "*Lugar del cuerno prendido*" de las sílabas Chic, prender o clavar algo y Xulub, cuerno; el cual se encuentra localizado en las coordenadas de latitud y longitud de aproximadamente 21°17'34.30"Norte y 89°46'27.49"Oeste, con una elevación de 0 metros sobre el nivel del mar, tiene un diámetro aproximado de 200 kilómetros, tiene una parte en el mar y otra en tierra, por este motivo se pueden hacer investigaciones usando métodos geofísicos terrestres, marinos y aéreos. En esta zona tenemos la presencia de secuencias sedimentarias carbonatadas así como sus relaciones con depósitos Cretácico-Terciario en las regiones adyacentes al Golfo de México y del Mar Caribe (Ortiz Alemán, Fucugauchi Urrutia et al. 2002).

El impacto provocó un gigantesco tsunami en todas direcciones, que golpeó la isla de Cuba fuertemente. La emisión de polvo y partículas, causó cambios ambientales quedando, la superficie terrestre, totalmente cubierta por una nube de polvo. Esta secuencia coincide con la teoría postulada por el físico estadounidense Luis Walter Álvarez y su hijo geólogo Walter Álvarez (Alvarez, Alvarez et al. 1980), para la extinción de los dinosaurios, pudo haber sido causado por el impacto de un meteorito de tales

dimensiones. Esta teoría es aceptada ampliamente por la comunidad científica (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2011).

La principal evidencia es que los efectos del impacto incluyen la inyección en la atmósfera de grandes cantidades de roca pulverizada, causando un bloqueo de la radiación solar, el enfriamiento global y la interrupción de los procesos de fotosíntesis, estas cantidades de roca pulverizada formaron una capa de sedimentos alrededor de la tierra. Esta capa se caracteriza por el enriquecimiento de iridio, con una concentración de alrededor de 30, 60 y 20 veces los niveles de base a través de las secciones. El iridio y otros elementos del grupo del platino y las características químicas y mineralógicas de las capas de arcilla, fueron interpretados en términos de una colisión de un asteroide de gran tamaño en el límite del Cretácico-Paleógeno (K-Pg) (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2011).

La formación del cráter y el evento de impacto ocurren en un corto tiempo del orden de centenas de segundos, con una alta liberación de energía y la excavación de una cavidad con profundidades del orden de 25 kilómetros, afectando toda la corteza. La corteza inferior y manto superior son deformados y se tiene un levantamiento en la parte central de la excavación de varias decenas de kilómetros que forma un levantamiento de basamento que caracteriza a estos cráteres complejos. La zona de impacto es deformada y fracturada (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2011).



**Fuente:** Imagen del libro El cráter de Chicxulub. (Poveda and Espejo 2007).

## Hipótesis del Impacto

Antes de la teoría propuesta en 1980, ya se había sospechado que la extinción masiva del Cretácico-Terciario estuviera asociada a causas extraterrestres, tales como los efectos de supernovas y la colisión de meteoritos.

Un grupo de colaboradores encabezado por Luis Álvarez, encontró evidencia experimental sobre un posible impacto. Ellos se encontraban investigando las secuencias sedimentarias carbonatadas en la provincia de Umbría en Italia, en donde los estudios paleontológicos de pequeños organismos marinos habían permitido localizar la frontera Cretácico-Terciario. Esta frontera se representa por una delgada capa de arcilla intercalada entre formaciones carbonatadas.

Los investigadores se interesaron en estimar el tiempo involucrado en la formación de esta capa y para ello decidieron analizar el contenido de iridio, elemento que es relativamente raro en rocas terrestres y abundante en material extraterrestre (Ortiz Alemán, Fucugauchi Urrutia et al. 2002).

Los análisis indicaron que la cantidad de iridio era mucho más elevada que la esperada de acuerdo al modelo de polvo cósmico como fuente principal, este modelo constituía la entrada a la atmósfera de polvo cósmico el cual se acumulaba en los sedimentos marinos. El intento de explicar esto es en la entrada masiva de material rico en iridio, como el impacto de un asteroide. De acuerdo a la concentración relativa de iridio por encima del nivel base en diferentes secciones de Italia, Dinamarca y Nueva Zelanda, se estimó el tamaño del asteroide en unos  $10\pm 4$  kilómetros de diámetro y sugirieron que el impacto dio lugar a una nube de polvo que cubrió al planeta por un periodo de varios meses.

El trabajo de Álvarez fue seguido por otras investigaciones que documentaron la presencia de la anomalía de iridio y de otros elementos del grupo del platino en otras secciones del (K-T) en diferentes partes del mundo. Debido a esto se realizaron estudios sobre las características del impacto en diferentes escenarios (marinos y terrestres), los posibles efectos ambientales y climáticos, así como de sus implicaciones para la extinción de los organismos. Álvarez y sus colaboradores discutieron sobre la posible localización del cráter, lo que dio lugar a la búsqueda del sitio de impacto. Dado que en ese momento los investigadores no eran tan optimistas en localizar el cráter (dado que podría haberse formado en corteza oceánica y haber sido destruido por los procesos de subducción o bien haber sido erosionados), localizar el sitio de impacto se consideró importante para entender los procesos y efectos en la biósfera (Alvarez, Smith et al. 1992). Por ejemplo, un impacto en una plataforma carbonatada con evaporitas facilitaría el ingreso a la atmósfera de vapor de agua, bióxido de carbono, compuestos de nitrógeno o azufre, que incrementarían los efectos nocivos en la biósfera (lluvia ácida, entre otros). Un impacto en el mar daría lugar a la generación de tsunamis en regiones costeras adyacentes (Ortiz Alemán, Fucugauchi Urrutia et al. 2002).

## Efectos en la atmósfera y la extinción de organismos

Entre los efectos sugeridos se tiene el impacto y la onda de choque que deben haber provocado efectos severos en la región. Como ya mencionamos la capa de polvo derivada del impacto fue eyectada caliza a la parte más alta de la atmósfera.

La vegetación fue severamente afectada y en regiones como América del Norte y Japón los estudios indican reducciones drásticas en el polen de las plantas angiospermas. El clima fue alterado y se dio un periodo de clima frío.

Estudios en plantas fósiles en América del Norte han apoyado la teoría de un intervalo de clima frío que coincide con la frontera (K-T). Los efectos del impacto y la nube de polvo pudieron haber causado efectos en parámetros climatológicos tales como el ciclo hidrológico. Los resultados de algunas simulaciones que emplean modelos globales han sugerido que los patrones de precipitación fueron afectados severamente por un periodo de varios meses.

Para el caso de impactos en el océano o que involucran rocas ricas en evaporitas, se ha sugerido que el aumento en compuestos de nitratos, azufre y vapor de agua provocarían fenómenos de lluvia ácida y un efecto invernadero, los cuales a su vez provocarían la extinción de microorganismos.

Estudios recientes han tratado de cuantificar las cantidades de algunos de los compuestos que ingresan a la atmósfera como resultado del impacto e investigando los posibles efectos en la biósfera. El efecto del incremento de gases de efecto invernadero daría lugar a un clima cálido para el inicio del Paleógeno.



**Fuente:** Imagen de la Asociación Cultural de Paleontología Murciana. Silvia Sorbi (2009).

## Dimensiones del cráter

Estudios en el cráter de Chicxulub se exploró a partir de la década de los años 50, el centro del cráter se encuentra cercano a la provincia de Chicxulub.

Se reportó una edad de  $64.98 \pm 0.05$  millones de años y también se mencionaron las edades para la capa del K-Pg en la sección sedimentaria. El cráter, localizado en la porción noroeste NW de la península de Yucatán, está cubierto por sedimentos carbonatados. El cráter tiene un diámetro aproximado de 200 kilómetros, está una parte en el mar y otra en tierra, por este motivo se pueden hacer investigaciones usando métodos geofísicos terrestres, marinos y aéreos. El impacto en la zona de Chicxulub marca la frontera entre el Cretácico-Paleógeno (K-Pg) y las extinciones masivas de organismos.

La formación del cráter y el evento de impacto ocurren en un corto tiempo del orden de centenas de segundos, con una alta liberación de energía y la excavación de una cavidad con profundidades del orden de 25 kilómetros, afectando toda la corteza. La zona de impacto es deformada y fracturada.

Los estudios paleontológicos habían permitido localizar la frontera Cretácico-Terciario. Esta frontera se representa por una delgada capa de arcilla intercalada entre formaciones carbonatadas.

Las anomalías concéntricas semi-circulares fueron inferidas de  $52.5 \pm 5$  kilómetros,  $77.1 \pm 6.3$  kilómetros,  $99.6 \pm 6$  kilómetros y  $139 \pm 11$  kilómetros de distancia radial, también mostró un reflector aproximadamente de  $1.1 \pm 0.4$  kilómetros de profundidad, que provisionalmente se correlaciona con el límite del K-Pg.

En la península de Yucatán, no existen afloramientos en superficie de litologías de impacto y la presencia de la estructura enterrada, indican una depresión topográfica semi-circular de amplitud baja que puede observarse en imágenes de satélite.

Los estudios sugieren que el oleaje del mar en el cráter, resultó en la erosión de la roca caliza y consecuentemente de los depósitos de las brechas, posiblemente también afectan la morfología del anillo. Sí el anillo estaba por encima del nivel del mar, pudo haber sido sometido a colapsos de erosión y de pendiente.

Depósitos gruesos residuales de carbonato se producen en áreas cercanas al Golfo de México, resultando la deformación que afecta la plataforma carbonatada. El cráter de Chicxulub desde entonces ha sido cubierto por carbonatos terciarios post-impacto.

Medir el tamaño del cráter puede parecer trivial, pero en realidad se plantea un problema en los modelos numéricos de los cráteres de impacto a gran escala, donde la gravedad juega un papel dominante en la formación del cráter.

La formación del cráter es un proceso rápido de energía alta, que requiere de altas temperaturas y presiones. Grandes volúmenes de material fundido o vaporizado fueron expulsados, formando un penacho y una cortina de material expulsado.

La cantidad y la extensión del colapso dependen sensiblemente de las propiedades de resistencia del material objetivo y el tamaño de la escala depende del impacto. Como consecuencia de ello, en los cráteres que han sufrido un colapso importante, el tamaño del cráter final no puede ser directamente relacionado con la energía cinética del cuerpo que impacta.

Estudios han dividido las características de los cráteres en 2 tipos, el primero es llamado cráter simple (o cráteres generados por explosiones en la Tierra). En este caso, el cráter transitorio y la geometría del cráter final, están en forma de cuenca, pero el cráter final tiene una profundidad menor al diámetro. Sin embargo, para cráteres simples a menudo es posible estimar las dimensiones del cráter transitorio.

En cráteres de tamaño grande (su equivalente en mayor gravedad o de menor fuerza del objetivo) la modificación puede ser mucho más extrema, lo que llamamos cráteres complejos. El colapso de los cráteres complejos, implica rebotes en el suelo del cráter (y temporalmente sobrepaso de la superficie de destino antes del impacto) y la caída de las paredes del cráter hacia abajo y hacia el centro del cráter. En este caso, el cráter final es muy diferente a la del cráter transitorio que es muy difícil estimar el tamaño del cráter transitorio. Los cráteres simples en forma de cuenca son gravitacionalmente inestables y colapsan para formar cráteres complejos.

Estudios gravimétricos y magnéticos ayudaron a inferir la morfología y el tamaño del cráter, con la anomalía de Bouguer en la línea de costa del puerto de Chicxulub. La geometría del cráter se estimó a partir de las anomalías de gravedad. Estudios del campo magnético observan los contrastes en las propiedades magnéticas del subsuelo, los cuales determinaron y documentaron las principales fuentes de anomalías magnéticas y la estructura del cráter en la zona central.

Los estudios de prospección sísmica permitieron obtener la imagen de la cuenca sedimentaria carbonatada y la secuencia de rocas impactadas formadas por brechas y rocas fundidas o derretidas, así como de la disposición estructural de las fracturas del anillo que define el cráter.

Las características de la plataforma carbonatada, que no ha sido afectada por actividad tectónica o volcánica reciente, permiten tener mayor resolución en los estudios geofísicos e investigar la estructura del cráter con una alta precisión.

El crecimiento del cráter es en gran parte controlado por la gravedad y el cráter transitorio es modificado por la gravedad impulsada por el colapso del cráter. Las dimensiones del cráter transitorio se miden, o son relacionadas con la superficie pre-impacto y la heterogeneidad en el objetivo inicial. El ángulo de incidencia afecta el tamaño y la forma del cráter transitorio.

## Descripción de la anomalía

El cráter de Chicxulub se encuentra localizado en la provincia de Chicxulub, puerto localizado a unos kilómetros al este de Puerto Progreso, por ello el nombre que recibe. Se ha estimado la energía liberada en el momento del impacto y fue de unos  $4.3 \times 10^{23}$  Joules, que equivale a unos 191,793 Gigatonnes de TNT, así como estimaciones más precisas sobre la geometría y las características más significativas del cráter, así como sus relaciones con la geología del lugar.

Chicxulub es uno de tres cráteres complejos de multi-anillos documentados en el registro terrestre y el impacto es relacionado a los cambios ambientales y climáticos que marcan la frontera entre el Cretácico-Paleógeno (K-Pg) y las extinciones masivas de organismos. El cráter, localizado en la porción noroeste de la península de Yucatán, está cubierto por sedimentos carbonatados y fue identificado inicialmente en los estudios dentro del programa de exploración de Petróleos Mexicanos (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010).

Los análisis de los registros geofísicos y petrografía de muestras de núcleos recuperados, documentaron la presencia de unidades ígneas, que se interpretaron juntamente con los estudios geofísicos en términos de un campo volcánico enterrado en la plataforma carbonatada en el noreste NE de Yucatán, también proporcionan datos sobre la estratigrafía del subsuelo (López Ramos 1975). Los pozos perforados dentro de la anomalía geofísica, recuperaron muestras de rocas ígneas de composición andesítica que sugiere una edad del Cretácico Superior. Los resultados del programa de exploración no mostraron indicios de yacimientos petroleros y gas en la zona (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010).

La corteza inferior y manto superior son deformados y se tiene un levantamiento en la parte central de la excavación de varias decenas de kilómetros que forman un levantamiento de basamento que caracterizan a estos cráteres complejos. La zona de impacto es deformada y fracturada (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010).

La geometría del cráter se estimó a partir de las anomalías de gravedad que muestran un radio central alto de aproximadamente 20 kilómetros, así como de radios internos concéntricos bajos de aproximadamente 35 y 60 kilómetros, respectivamente. Los estudios de gravimetría, dieron como resultado un mapa del gradiente horizontal, el cual define dos anillos concéntricos de anomalías positivas, el anillo interno delimita la zona de elevación central y el anillo exterior relacionado con el anillo de cenotes (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010).

En la península de Yucatán, no existen afloramientos de superficie de litologías de impacto y la presencia de la estructura enterrada, indican una depresión topográfica semi-circular de amplitud baja que puede observarse en imágenes de satélite (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010).

(Penfield, Camargo-zanoguera et al. 1981), estiman la profundidad para las fuentes magnéticas profundas cerca de 1.1 kilómetros, con el apoyo de la asociación de las estructuras del cráter debajo de la cubierta sedimentaria Paleógena. Análisis posteriores separan el campo de la anomalía magnética en tres amplias estructuras concéntricas, asociadas a la geometría del cráter y posibles cuerpos de origen. La anomalía magnética concéntrica coincide aproximadamente con la anomalía de la gravedad y la distribución del

hundimiento del anillo semi-circular (Pilkington, Hildebrand et al. 1994) y (Hildebrand, Pilkington et al. 1998).

Los anillos del cráter y el anillo de picos, pueden estar asociados con el colapso de la cavidad transitoria y la deformación de la elevación central con los cabalgamientos y la zona de terraza predominante (Morgan, Warner et al. 2011). En el primer trabajo de interpretación (Morgan, Warner et al. 1997); (Snyder, Hobbs et al. 1999) se dieron cuenta de la presencia de fallas normales alrededor del centro del cráter de impacto y del levantamiento central. La estructura se compone de bloques inclinados separados por fallas normales en rocas pre-impacto deformadas (Mesozoico y pre-Mesozoico).

Los análisis de los perfiles sísmicos se han ocupado también de la cartografía de los bloques de la zona de terraza y las fallas, así como de la caracterización de las brechas de colapso y de las unidades fundidas o derretidas (Vermeesch, Morgan et al. 2004); (Gulick, Barton et al. 2008); (Canales I. 2010). Con base en la interpretación sísmica y otras evidencias de los pozos, se proponen 4 etapas acerca de las fracturas o de las fallas:

- 1.- Ocurrió en el momento del impacto formando una cavidad transitoria.
- 2.- Se produjo cuando la elevación central y la capa de material expulsado se derrumbó ó colapsó, durante esta etapa la estructura de anillo de pico se formó.
- 3.- Se desarrolló la zona de terrazas ó bloques inclinados.
- 4.- Debido a la compactación diferencial, se produjeron fallas menores y el hundimiento.

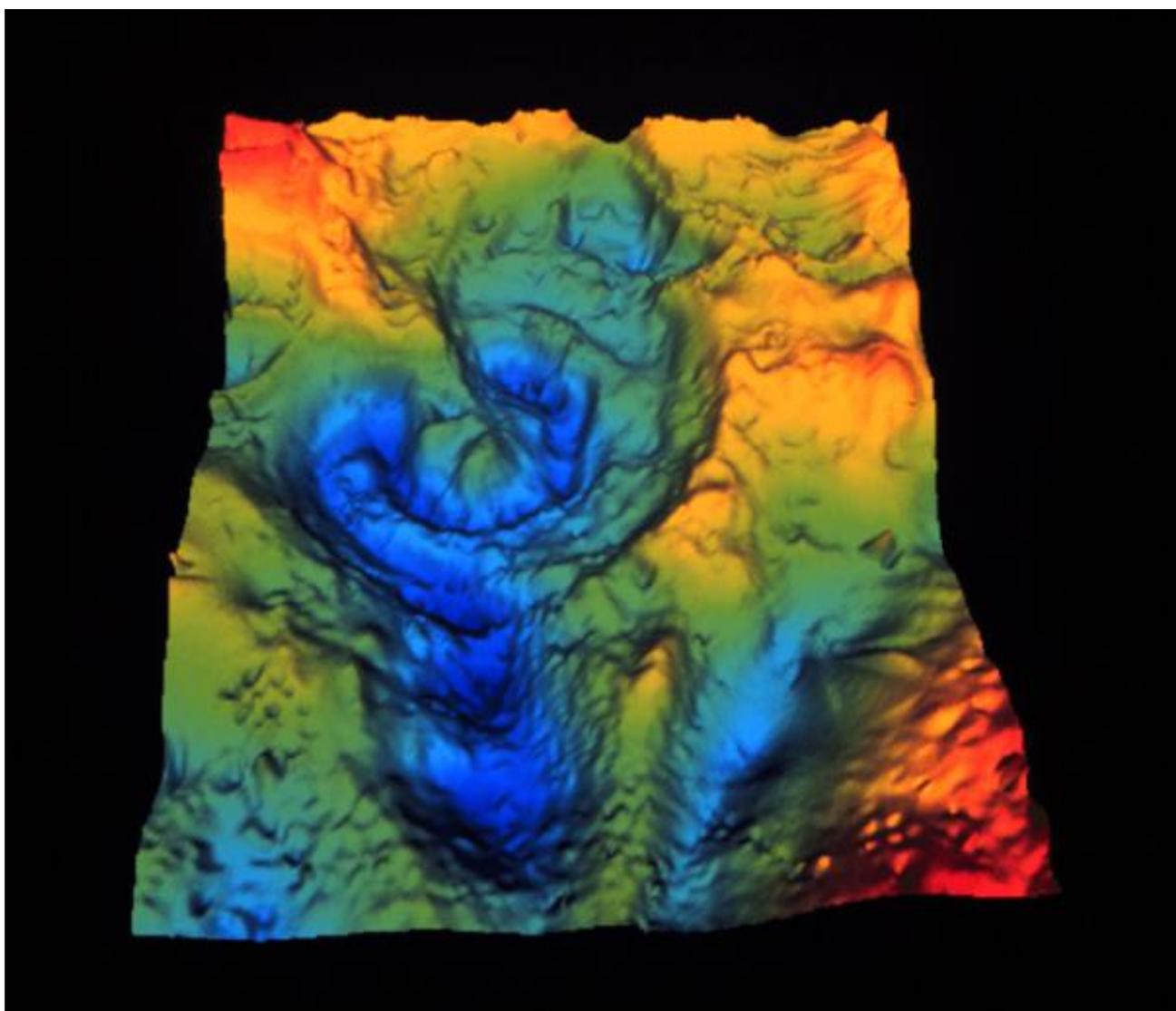
Los estudios sugieren que el oleaje del mar en el cráter, resultó en la erosión de las rocas calcáreas y de las brechas producidas, posiblemente también afectan la morfología del anillo. Sí el anillo estaba por encima del nivel del mar, pudo haber sido sometido a colapsos de erosión y de pendiente. Las condiciones después de la formación del cráter y del material expulsado, así como del restablecimiento de la sedimentación de carbonatos han sido pobremente restringidas. La ocurrencia de procesos erosivos, se indican por la presencia de unidades delgadas del basamento observadas en los pozos (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2010).

Durante el colapso, el suelo del cráter se eleva hasta formar una elevación central, que puede o no ser visible como un pico central (Scherler, Kenkmann et al. 2006).

El anillo de pico se encuentra a unos 400 metros menos profundo en el sector occidental que en el sector oriental, con el reflector de profundidad principal que está también a 1 kilómetro más hacia el oeste W. La zona de terraza es más profunda en el lado oeste, con bloques caídos a una profundidad de 2 kilómetros en el sector noroccidental (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2010)

Depósitos gruesos residuales de carbonato se producen en áreas cercanas al Golfo de México, resultando la deformación que afecta la plataforma carbonatada (Alvarez, Smith et al. 1992). La cubierta de sedimentos, la ausencia de una importante actividad volcánica y tectónica en la plataforma carbonatada, han protegido el cráter de la erosión y de deformación, por lo que el cráter Chicxulub, es el único cráter multi-anillo en el que se expulsó material y está bien conservado (Chavez-Aguirre, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008).

Las leyes de escala describen la relación funcional entre las propiedades del meteorito o cuerpo que impacta (densidad  $\delta$ , velocidad  $v$ , diámetro  $L$ ), las propiedades del objetivo (densidad  $\rho$ , fuerza  $Y$ , gravedad  $g$ ) y el tamaño del cráter. Medir el tamaño del cráter puede parecer trivial, pero en realidad se plantea un problema en los modelos numéricos de los cráteres de impacto a gran escala, donde la gravedad juega un papel dominante en la formación del cráter.



**Fuente:** Virgil L. Sharpton, University of Alaska, Fairbanks. Lunar and Planetary Institute.  
[http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM\\_ID=791](http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM_ID=791)

## Estudios geofísicos

Los modelos geofísicos han tenido una gran importancia para la obtención de información acerca del origen, formación, el progreso y la evolución del cráter de impacto de Chicxulub, algunos de estos modelos son explicados brevemente en este proyecto de investigación.

Los resultados de los modelos numéricos indican que en las primeras etapas del impacto, el material objetivo está sometido a compresiones altas debidas al impacto y este material es expulsado del cráter a grandes velocidades. Aunque la velocidad del material expulsado inicial es menor o igual a  $2\text{ km/s}$ , este material de impacto alto entra en la parte exterior de la primera formación del penacho, y luego se acelera a altas velocidades durante la expansión del penacho. Por lo tanto, el material de impacto alto sale del cráter con mayor velocidad y termina más lejos del sitio del impacto. Para impactos oblicuos del modelo numérico predice que el impacto varía de acuerdo con la dirección, para cualquier distancia en particular del sitio de impacto, el mayor rango de material expulsado es el de mayor impacto.

Los estudios de laboratorio así como los modelos de laboratorio indican que la formación de cráteres, se miden según al ángulo de trayectoria del bólido, el cual afecta los resultados en los eventos de impacto.

Para estudios de bajo ángulo de impacto, se obtuvo que la cantidad de sedimento (capa superficial) se vaporizó en el impacto alcanzando un máximo para un ángulo de impacto de  $30^\circ$  con respecto a la superficie, que corresponde a menos de dos veces la cantidad de vaporización para el caso vertical. La cantidad de corteza continental derretida en el impacto disminuye de forma monótona (como consecuencia de la disminución de la profundidad máxima de la roca fundida) de la capa de impacto vertical para el impacto de  $15^\circ$ . La cantidad del proyectil arrastrado en el penacho de expansión en las primeras fases del impacto aumenta a medida que disminuye el ángulo de impacto. Schultz escribe que existe más desgaste en los impactos de ángulo bajo debido al calentamiento por cizalladura (Pierazzo, Melosh et al. 1999).

Para ángulos de impacto oblicuos de  $15^\circ$  a  $45^\circ$ , esperamos que el material proximal expulsado desapareció en la dirección del cuerpo que impacta, pero las secuencias estratigráficas del material proximal expulsado son observados en el sureste SE (Belice), el este E (Haití) y el sur S de Chicxulub (México) (Morgan, Lana et al. 2006)

Para estos casos un ángulo alto es una trayectoria vertical, para este estudio se obtuvo que el derretimiento y la vaporización, se produzcan principalmente en la dirección hacia el suelo para estos impactos oblicuos, debido a las asimetrías en la fuerza de la onda de choque en relación con el punto de impacto. También los experimentos de laboratorio para impactos oblicuos, demuestran que la energía cinética está involucrada con la excavación del cráter que disminuye de manera significativa con el ángulo de impacto (Pierazzo, Melosh et al. 1999). La masa desplazada de un cráter disminuye con el ángulo de impacto (Wünnemann, Elbeshausen et al. 2009).

De acuerdo con las poblaciones de cráteres observados en las superficies planetarias y en experimentos de laboratorio de impactos oblicuos en ángulos mayores de 30° a la superficie del objetivo, producen cráteres circulares.

Un nuevo análisis realizado por (Morgan, Lana et al. 2006) concluyó que la distribución mundial de cuarzo de choque es compatible con un impacto individual de ángulo alto.

Estudios marinos y continentales cerca del cráter de Chicxulub han obtenido muestras con mayor contenido de iridio y minerales de choque en comparación con los sitios más distales (Bourgeois, Hansen et al. 1988); (Alvarez, Smith et al. 1992); (Urrutia-Fucugauchi 1993), describe una posible relación con un ángulo de impacto bajo.

Los estudios de modelos dinámicos, realizaron experimentos, se construyeron dos modelos, uno de los modelos, representa el sector noroeste NW el cual no tiene una capa de agua pero tiene una capa gruesa de sedimento, el otro modelo representa el sector noreste NE donde tenemos la presencia de una capa de agua por encima de una capa de sedimentos. Los modelos numéricos de los impactos verticales en estos dos cráteres producidos difieren sustancialmente en la geometría de la zona de terraza, lo que sugiere que la profundidad inicial del agua y las variaciones de espesores de los sedimentos, afecta la estructura de la zona de terraza en Chicxulub (Collins, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008).

Se han sugerido trayectorias para el cráter de impacto de Chicxulub, uno de ellos es un impacto oblicuo dirigido al noroeste NW que ha sido relacionado con efectos ambientales y la distribución del material expulsado, así como el cuarzo impactado en el interior de las secciones de Norteamérica (Claeys, Kiessling et al. 2002), los estudios de modelos sísmicos y magnéticos interpretan que la anomalía va haciéndose más profundas en el sector noreste NE de la base de la capa de la secuencia Mesozoica de 3 a 3.5 kilómetros de profundidad y la profundidad del agua a 1.5 kilómetros más profunda (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2011).

(Schultz, D'Hondt et al. 1996) sugieren una dirección noroeste NW hacia el suelo, la cual dice que las estructuras centrales están desplazadas lejos de las excavaciones superficiales causadas por el impacto oblicuo y sugieren que la interacción entre el anillo de pico, la dirección del impacto oblicuo y la forma de la cavidad transitoria, no son entendibles.

(Hildebrand, Pilkington et al. 1998) sugiere una dirección noreste NE, que corresponde a una zona de terraza más profunda y más gradual comparada con el noroeste NW (Gulick, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008), lo que sugiere que el anillo de pico fue desplazado lejos de la pared empinada de la cavidad transitoria.

Con base en análisis previos de los pequeños cráteres de Venus, se muestra que las variaciones en la posición del pico central no tienen relación con la dirección del impacto. La vinculación del anillo de pico, del offset o desplazamiento del pico central al recorrido del impacto que parece ser una simplificación de los procesos de formación de cráteres.

Los modelos aeromagnéticos sobre el cráter nos revelan tres patrones fuertes que son concéntricos y bien definidos, la cual tiene un diámetro en la zona central de 40 kilómetros de anomalías de gran amplitud. Las fuentes magnéticas tienen una profundidad que oscilan entre los 2 y 4 kilómetros. Estudios aeromagnéticos permitieron a (Penfield, Camargo-zanoguera et al. 1981) proponer un origen de impacto alternativo para la estructura enterrada. La interpretación de la estratigrafía del subsuelo, sugiere una edad del Cretácico Superior para el cuerpo andesítico (López Ramos 1975).

Los estudios de petrografía y geoquímica se dieron a la tarea de investigar la evaluación de un origen de impacto para la estructura. Esto involucra la identificación de los indicadores mineralógicos de metamorfismo de choque y la ocurrencia de brechas de impacto, así como de la formación derretida de una secuencia de impacto (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2010).

Las perforaciones de pozos han proporcionado información sobre la estratigrafía del subsuelo y la estructura, así como del material para los estudios de las propiedades físicas en laboratorio, características de impacto, litologías generadas por el impacto, características de los meteoritos o bólidos, así como de componentes del basamento profundo (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2010).

La estratigrafía y la edad del impacto han sido estudiadas a partir de la información de pozos, la datación radiométrica, la bioestratigrafía, la estratigrafía secuencial, la polaridad magnética y los estudios de isótopos estables (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2010).

A pesar de los altos contrastes en las propiedades físicas es probable la caracterización de los carbonatos, rocas fundidas, brechas de impacto y del basamento, la construcción de modelos de alta resolución y el uso de métodos inversos y directos se limitan por la falta de datos sobre las propiedades físicas (Hildebrand, Penfield et al. 1991); (Urrutia-Fucugauchi, Marin et al. 1994); (Urrutia-Fucugauchi, Morgan et al. 2004).

El programa de perforación de PEMEX investigó la estratigrafía de las secuencias Mesozoica y Cenozoica, documentando la presencia de texturas de rocas ígneas en el área de las anomalías gravimétricas y magnetométricas concéntricas, a profundidades aproximadamente de 1.0 a 1.1 kilómetros.

Los estudios geofísicos, los programas de perforación y extracción de núcleos en el cráter de Chicxulub, han contribuido a nuestra comprensión de la dinámica de los procesos de la formación de los cráteres de impacto y en particular sobre la formación de las grandes estructuras de multi-anillos (Melosh 1989); (Gulick, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008); (Urrutia-Fucugauchi, Perez-Cruz et al. 2009). La formación del cráter es un proceso rápido de energía alta, que requiere de altas temperaturas y presiones. Grandes volúmenes de material fragmentado fueron expulsados, formando un penacho y una cortina de material fundido, con grandes picos.

El impacto y la formación del cráter se producen de forma instantánea, con la excavación de la corteza a una profundidad de aproximadamente 25 kilómetros en unas fracciones de segundo, y la elevación de la corteza inferior, así como de la formación del cráter en los próximos 100 segundos. La liberación de la energía y la deformación de la corteza, generan ondas sísmicas que viajan por toda la tierra, dando lugar a fracturas y deformaciones intensas en la periferia del impacto.

Estudios que explican la formación del cráter sugieren que esto se divide en tres etapas (Melosh, 1989). En primer lugar, durante el contacto y la etapa de compresión, el meteorito que impacta choca con el objetivo, lo que genera una onda de choque en la zona de contacto entre el cuerpo que impacta y el objetivo. En segundo lugar, durante la etapa de excavación, la onda expansiva se propaga a través del objetivo, la transferencia de energía, así como del establecimiento de una excavación que se abre un profundo cráter en forma de cuenca. Eventualmente, el crecimiento del cráter se detiene cuando la energía cinética es insuficiente para desplazar el objetivo en contra de su propio peso (cráteres dominados por la gravedad) o en contra de la fuerza cohesiva del material objetivo (cráteres dominados por la fuerza). Por último, el material objetivo es débil o el peso del material desplazado es grande, la profundidad del cráter puede colapsar para formar un cráter final, por lo general, un mayor colapso aumenta el diámetro del cráter, pero disminuye el volumen y la profundidad del cráter. La cantidad y la extensión del colapso dependen sensiblemente de las propiedades de resistencia del material objetivo y el tamaño de la escala del impacto. Como consecuencia de ello, en los cráteres que han sufrido un colapso importante, el tamaño del cráter final no puede ser directamente relacionado con la energía cinética del cuerpo que impacta. (Wünnemann, Elbeshausen et al. 2009).

Estudios han dividido las características de los cráteres en 2 tipos, el primero es llamado cráter simple (o cráteres generados por explosiones en la Tierra), la modificación se manifiesta como el colapso menor de los bordes y la agrupación de residuos en el cráter (Grieve 1977). En este caso, el cráter transitorio y la geometría del cráter final, están en forma de cuenca, pero el cráter final tiene una profundidad menor al diámetro. Sin embargo, para cráteres simples a menudo es posible estimar las dimensiones del cráter transitorio (Grieve 1989).

En cráteres de tamaño grande (su equivalente en mayor gravedad o de menor fuerza del objetivo) la modificación puede ser mucho más extrema, lo que llamamos cráteres complejos. El colapso de los cráteres complejos, implica rebotes en el suelo del cráter (y temporalmente sobrepaso de la superficie de destino antes del impacto) y la caída de las paredes del cráter hacia abajo y hacia el centro del cráter. En este caso, el cráter final es muy diferente a la del cráter transitorio que es muy difícil estimar el tamaño del cráter transitorio. Sin embargo, experimentos de laboratorio en arena seca (Gault, Wedekind et al. 1978) y las observaciones de los cráteres lunares (Pike 1974), reveló que la relación entre el diámetro del borde del cráter y el diámetro aparente, es aproximadamente el mismo para todas las escalas y es independiente de la gravedad.

Estudios de los datos gravimétricos y magnéticos ayudaron a inferir la morfología y el tamaño del cráter, con la anomalía de Bouguer en la línea de costa del puerto de Chicxulub (Hildebrand, Penfield et al. 1991). La geometría del cráter se estimó a partir de las anomalías de gravedad que muestran un radio central alto de aproximadamente de 20 kilómetros (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2010).

Estudios del campo magnético observan los contrastes en las propiedades magnéticas del subsuelo sobre el cráter de impacto de Chicxulub, los cuales determinaron y documentaron las principales fuentes de anomalías magnéticas y la estructura del cráter en la zona central (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010).

Los modelos de anomalía magnética muestran cambios marcados en el levantamiento central, lo que sugiere que la respuesta de la corteza inferior de la excavación del cráter transitorio fue asimétrico, que sugiere un proceso complejo que involucra zonas no heterogéneas de la corteza terrestre y de la dinámica del impacto, como ya mencionamos, el cráter de Chicxulub se encuentra una parte en el mar y otra en la tierra, esto provoca que sean dos objetivos de impacto diferentes, lo que dio lugar a diferentes geometrías de la zona de terraza, lo que indica que las no heterogeneidades objetivo pueden influir en la estructura del cráter.

Las fuentes de las anomalías magnéticas en la zona central del levantamiento estructural se encuentran en el rango de 3.5 a 8 kilómetros de profundidad, con contribuciones dominantes de un cuerpo aparentemente elevado que forman el levantamiento del basamento (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010).

Los estudios de prospección sísmica observan los contrastes en la velocidad de onda a través del medio o de los contactos, en el cráter de Chicxulub se estudió la estructura del cráter usando muchos perfiles de sísmica marina en la sección este-oeste E-W orientadas a lo largo de la costa. Este estudio permitió obtener la imagen de la cuenca sedimentaria carbonatada y la secuencia de brechas formada por las rocas impactadas y las rocas fundidas o derretidas, así como de la disposición estructural de las fracturas del anillo que define el cráter. Dos estudios de sísmica marina (1996 y 2005) se llevaron a cabo para investigar la morfología y la extensión del cráter (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2010).

Los perfiles sísmicos a través del cráter, documentan fallas a profundidad y deformaciones del límite entre la corteza y el manto (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2010).

Estudios sísmicos obtenidos muestran que las fallas de anillo interior, contienen estratos del Cretácico profundo y de poco espesor en un bajo topográfico hacia el noreste NE. Se sugiere que estos estratos reflejan la presencia de una cuenca pre-existente del Cretácico al norte N y al noreste NE ahora cubierta por una extensión de la cuenca de Chicxulub, debido a la ausencia de un borde del cráter del noreste NE. En el oeste W, la superficie del K-T contiene un alto topográfico que también se interpreta como una estructura pre-existente, dada la estratigrafía y la falta de fallas convergentes dentro de los anillos (Gulick, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008).

Estudios de modelos geofísicos indican que el reacomodo de los cráteres que están asociados con el colapso de la cavidad transitoria, la deformación de la elevación central con los cabalgamientos y la zona de terraza predominante en el momento del origen del cráter (Morgan, Warner et al. 1999). La estructura se compone de bloques inclinados separados por fallas normales y por rocas pre-impacto deformadas (Mesozoico y pre-Mesozoico).

Los estudios sugieren que el oleaje del mar en el cráter, provocó la erosión de los depósitos calcáreos y el consecuente depósito de brechas, posiblemente también afectaron la morfología del anillo. Si el anillo estaba por encima del nivel del mar, pudo haber sido sometido a colapsos de erosión y de gravedad. Las condiciones después de la formación del cráter y del material expulsado, así como del restablecimiento de la sedimentación de carbonatos han sido pobremente restringidas. La ocurrencia de procesos erosivos,

se indican por la presencia de unidades delgadas del basamento observadas en los pozos (Alvarez, Smith et al. 1992).

Los procesos de alta energía pueden haber actuado en el área del cráter, incluyendo la generación de tsunamis asociados con el resurgimiento y los procesos de erosión por lavado (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2010).



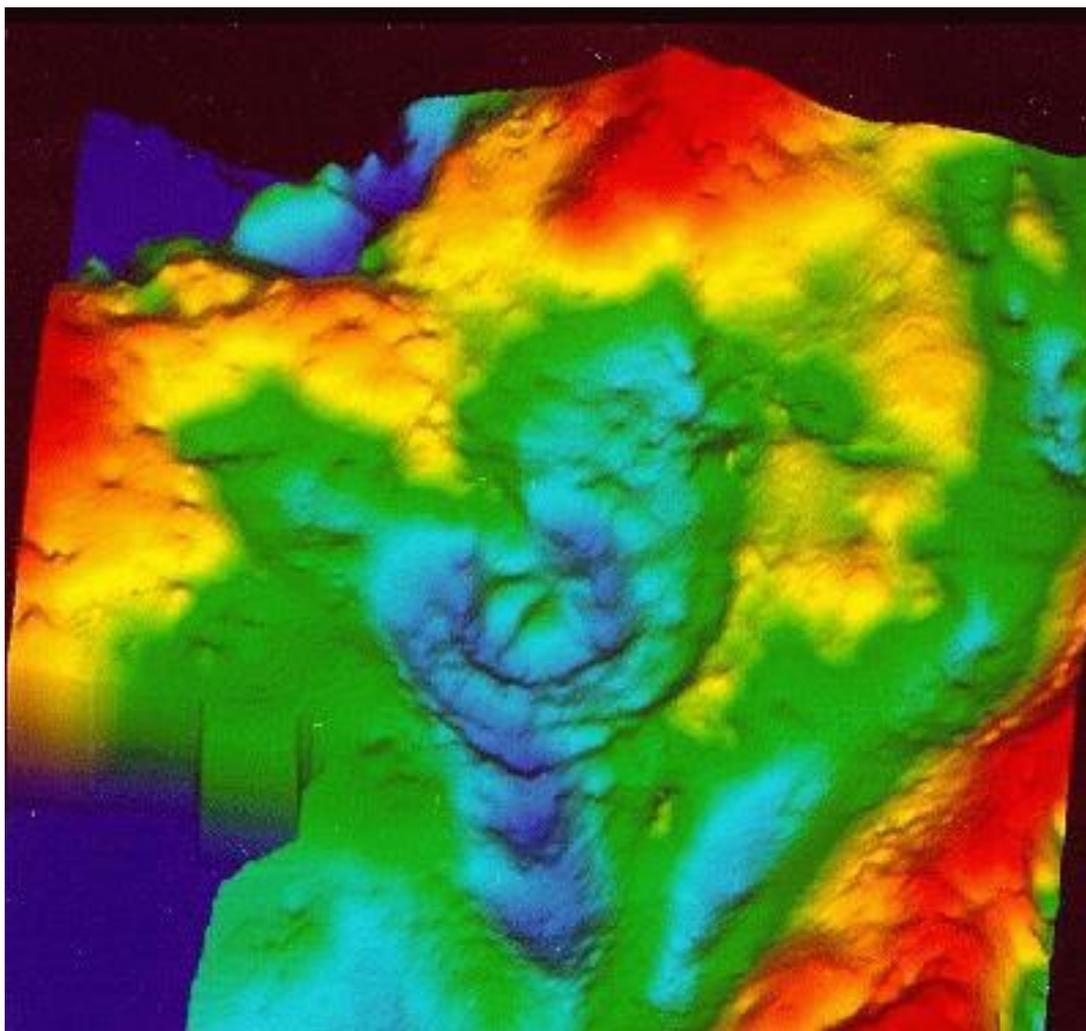
**Fuente:** NASA. Journal of the Geological Society on April 27, 2009.  
Self-shielding of thermal radiation by Chicxulub impact ejecta.  
Tamara J. Goldin and H. Jay Melosh.  
Lunar and Planetary Lab, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA.  
Pages 1135-1138.

## Objetivos

El objetivo general del trabajo es estudiar los efectos en el cráter relacionados a la trayectoria y al ángulo de impacto, o si son asociadas a otros factores los cuales modifican la estructura pre-existente en la zona impactante, por medio de modelado de las anomalías geofísicas del campo potencial.

Con los modelos obtenidos de la prospección gravimétrica, sísmica e interferometría en toda la región impactada por el meteorito, se analizarán las posibles trayectorias en la zona del cráter de Chicxulub. Para ángulos oblicuos de impacto se generan estructuras circulares y para ángulos bajos de impacto tenemos estructuras alargadas elípticas.

En este trabajo se estudiarán las posibles relaciones que tienen las anomalías gravimétricas en el sector sur del cráter de impacto de Chicxulub, seguidas por anomalías gravimétricas en la parte Norte N, noreste NE y en la parte Oeste W del cráter de Chicxulub (Figura). Estas anomalías alargadas se pueden asociar a diferentes orígenes, una está asociada a que las anomalías se originaron con el impacto y la otra es asociada a estructuras pre-existentes en el lugar y/o que fueron modificadas por el impacto.

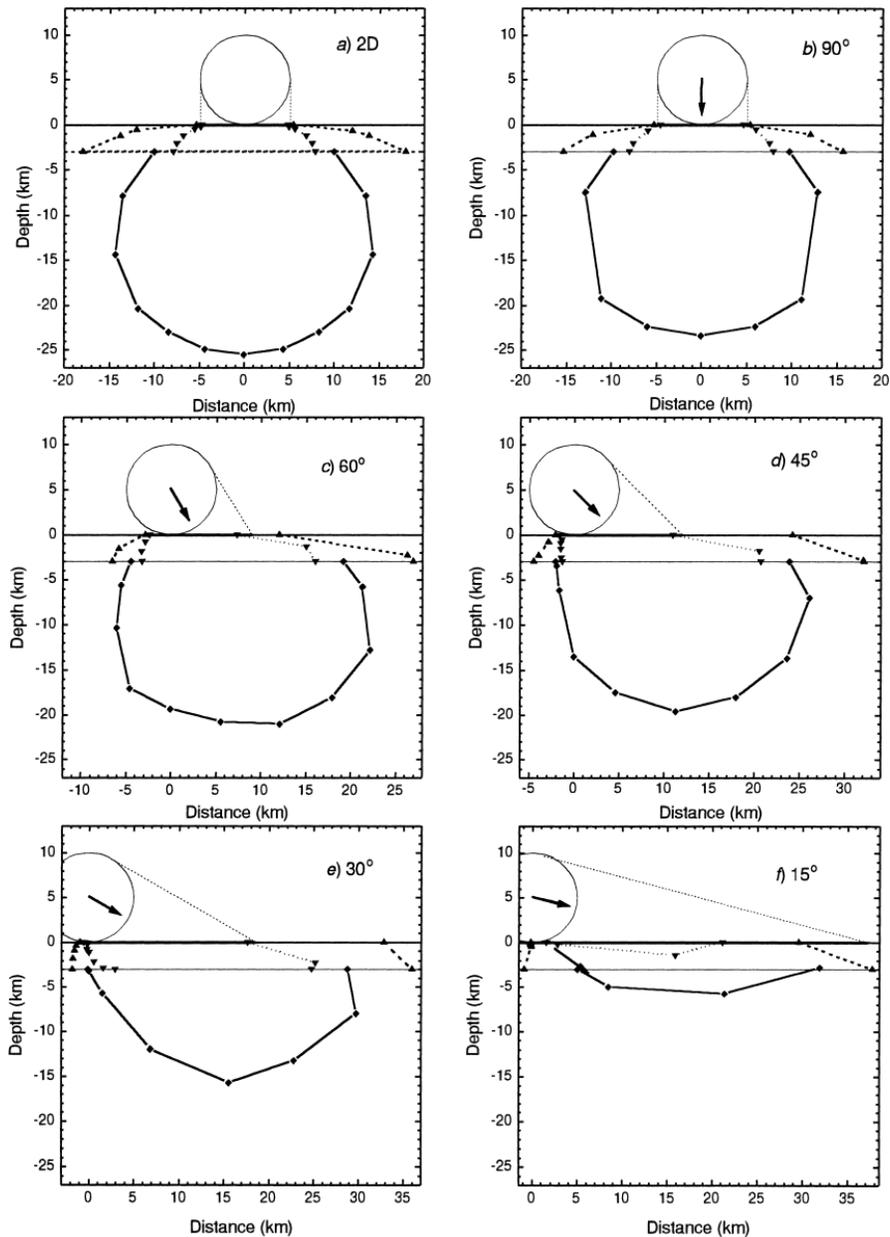


**Fuente:** Image by Alan Hildebrand, Geological Survey of Canada.  
Edited by Michael Higgins.

## Hipótesis

Una de las hipótesis para este trabajo de tesis es que para las diferentes trayectorias de impacto y estas con diferentes ángulos, dejan un cambio significativo en la geometría de la estructura del cráter.

La hipótesis de que la forma de las anomalías gravimétricas en la zona sur del cráter de Chicxulub, se pueden asociar a diferentes orígenes debido al impacto o a estructuras pre-existentes en el lugar que fueron modificadas por el impacto.



**Fuente:** Hydrocode modeling of Chicxulub as an oblique impact event.

Elisabetta Pierazzo, H. Jay Melosh. (Muestra la trayectoria y el desplazamiento de un meteorito de impacto, que distancia aproximada se desliza horizontalmente de acuerdo al ángulo de impacto).

# **Capítulo II**

## **Modelos Geofísicos**

## MODELOS GEOFÍSICOS

Antecedentes previos de estudios geofísicos, nos dan información y herramientas para este trabajo. El libro de Applied Geophysics, contiene un capítulo llamado Métodos Gravimétricos de (Telford, Geldart et al.), el cual nos explica más detalladamente los principios y la teoría elemental de los modelos matemáticos que nos ayudarán a entender más acerca del método de gravedad terrestre.

### Métodos Gravimétricos

La prospección gravimétrica adquiere mediciones en la variación del campo gravitacional terrestre con instrumentos sensibles para la obtención de datos gravimétricos. La prospección gravimétrica usa el método de la fuente natural, la cual varía con la densidad de las rocas que se encuentran cerca de la superficie, los cuales causan cambios instantáneos en el campo de gravedad principal.

Los métodos magnéticos y gravimétricos son similares en varias maneras, tanto los métodos magnéticos como los métodos gravimétricos intentan medir mínimas diferencias en el campo de fuerza que es relativamente enorme. En ambos casos los campos principales varían con la posición y en menor medida con el tiempo. En ambos métodos esto es posible para determinar el campo absoluto. Sin embargo, hay varias diferencias básicas entre la prospección gravimétrica y la prospección magnetométrica, ya que las variaciones en la densidad son relativamente pequeñas y uniformes comparadas con los cambios en la susceptibilidad magnética, las anomalías gravimétricas son mucho más pequeñas y mucho más suaves que las anomalías magnéticas. Los instrumentos usados en la gravimetría deben ser considerablemente más sensibles que los instrumentos usados en la magnetometría. La variación en el tiempo del campo magnético es mucho más complejo y más rápido, que la del campo de gravedad. Las correcciones a las lecturas observadas son mucho más complicadas en el trabajo de la prospección gravimétrica que en el trabajo en la prospección magnética, de hecho son más complicadas que cualquier otro método geofísico. La exactitud o precisión de las mediciones del campo anómalo es mucho mayor en la prospección magnética y el mismo instrumento puede ser empleado para medir los campos principales y las mínimas variaciones; esto no es aplicado para el trabajo con la prospección gravimétrica. Por otra parte, los instrumentos gravimétricos y el trabajo en campo, necesita más personal calificado, es más lento y es más caro que en la prospección magnetométrica.

La prospección gravimétrica es usada como una herramienta de reconocimiento en la exploración petrolera; aunque es demasiado cara, esto sigue siendo considerablemente más barato que los métodos sísmicos. En la exploración minera, esto es usualmente empleado como un método secundario, aunque recientemente esto se ha vuelto más popular para el seguimiento detallado de anomalías magnéticas o electromagnéticas durante los estudios en zonas que contienen una base de metal.

Este capítulo del libro que no mencionaremos detalladamente, tiene un apartado de todos los modelos matemáticos que se desprenden para llegar a entender mejor la teoría y los principios matemáticos fundamentales que se utilizan para llegar al siguiente apartado, que es el de las correcciones gravimétricas, que en el libro de Métodos Gravimétricos de W. M. Telford, son desarrollados de la siguiente manera:

### Reducciones de la Gravedad

#### a).- General.

El trabajo de campo que se lleva a cabo en tierra, donde tomamos lecturas de la gravedad en las estaciones que cubren un área de interés. Estas lecturas en general se verán influidas por la topografía y otros factores, por lo tanto debe ser corregido de las variaciones por latitud, altitud y topografía para reducirlos a los valores que tendrían en una superficie equipotencial, como el geoide, o una superficie siempre paralela al geoide. Dos correcciones adicionales en ocasiones pueden ser necesarias: se trata de la variación de la gravedad terrestre debido a las mareas y al efecto de la isostasia.

#### b).- Corrección por latitud.

Tanto la rotación de la tierra y su ligero abultamiento ecuatorial producen un aumento de la gravedad con respecto a la latitud. Debido a la rotación de la Tierra o que la Tierra está girando, (máximo en el ecuador y cero en los polos) la aceleración centrífuga se opone a la aceleración de la gravedad, mientras que el achatamiento polar también afecta y produce un aumento de la gravedad en los polos. Este último efecto se debe en parte por el aumento de la masa que se atrae en el ecuador. Por lo tanto, es necesario aplicar una corrección de latitud, donde tenemos algunas excursiones apreciables norte-sur de las estaciones de la malla. Se obtiene por la diferenciación de la ecuación (2.15):

$$g_t = 978,031.846 (1 + 0.005,278,895 \text{ sen}^2 \varphi + 0.000,023,462 \text{ sen}^4 \varphi) \text{ [miligales]} \quad (2.15)$$

$$\frac{dg_L}{ds} = \frac{1}{R_e} \left( \frac{dg_L}{d\varphi} \right) \approx \frac{1}{R_e} \left( \frac{dg_L}{d\varphi} \right) \approx 1.307 \text{ seno}(2\varphi) \left[ \frac{mGal}{milla} \right] \approx 0.811 \text{ seno}(2\varphi) \left[ \frac{mGal}{km} \right] \quad (2.16)$$

$g_t$  = valor teórico de la gravedad.

$ds = N - S$  es la distancia horizontal.

$\varphi$  = es la latitud.

$dg_L$  = corrección por latitud.

$R_e$  = es el radio de la Tierra.

El valor máximo se produce a una latitud de 45° cuando la corrección asciende a 0.01 miligales/40 pies. Evidentemente, es cero en el ecuador y los polos. La corrección es lineal en las distancias de norte a sur de aproximadamente una milla. Para los grandes registros es necesario tener en cuenta los cambios en  $\varphi$ . Dado que la gravedad aumenta con la latitud (norte o sur) la corrección se añade a medida que avanzamos hacia el ecuador, llegando a su máxima entre el ecuador y el polo a 45°.

### c).- Corrección por Aire Libre.

Ya que la gravedad varía inversamente con el cuadrado de la distancia, es necesario corregir los cambios de elevación entre las estaciones de modo que todas las lecturas de campo se reduzcan a una superficie de referencia. Esto se le conoce como la corrección por aire libre, ya que no tiene en cuenta el material entre la estación y el plano de referencia. Se obtiene por la diferenciación de la ecuación escalar equivalente a la ecuación (2.16), el resultado es:

$$\frac{dg_{AL}}{dR_e} = -\frac{2\gamma M_e}{R_e^3} \approx -\frac{2g}{R_{eq}} \approx -0.09406 \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{pies}} \right] = -0.3085 \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{metro}} \right] \quad (2.17)$$

El signo negativo indica que la corrección de aire libre se suma a la lectura de campo cuando la estación está por encima del plano de referencia y se resta cuando está debajo de él.

Para las consideraciones de las correcciones por latitud y por aire libre, la posición de la estación debe ser justamente conocida si se quiere hacer un uso correcto de los datos gravimétricos; esto debe estar ubicado dentro de los 1219.2 centímetros de distancia horizontal en Norte-Sur y su elevación debe ser medida con una precisión de al menos 5.08 centímetros en el cual el estudio puede tener una precisión de 0.01 miligales (que es la sensibilidad de los instrumentos de ahora).

### d).- Corrección de Bouguer.

La corrección de Bouguer considera la atracción que ejerce el material entre la estación y el plano de referencia, este efecto fue ignorado en el cálculo de la corrección de aire libre. Si la estación se encuentra localizada en una planicie de gran extensión horizontal y de espesor uniforme, la densidad de las lecturas de la gravedad se verían incrementadas por el efecto de este bloque, entre la estación y el dato registrado. La corrección de Bouguer se deriva que al asumir que el bloque está sobre una extensión horizontal infinita, viene dado por:

$$\frac{dg_B}{dR_e} \approx \frac{dg_B}{dR_{eq}} = 2\pi\gamma\sigma \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{pies}} \right] = 0.04188 \sigma \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{metro}} \right] \quad (2.18a)$$

$\gamma$  = constante de gravitación universal ( $6.67 \times 10^{-11} \left[ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \right]$ )

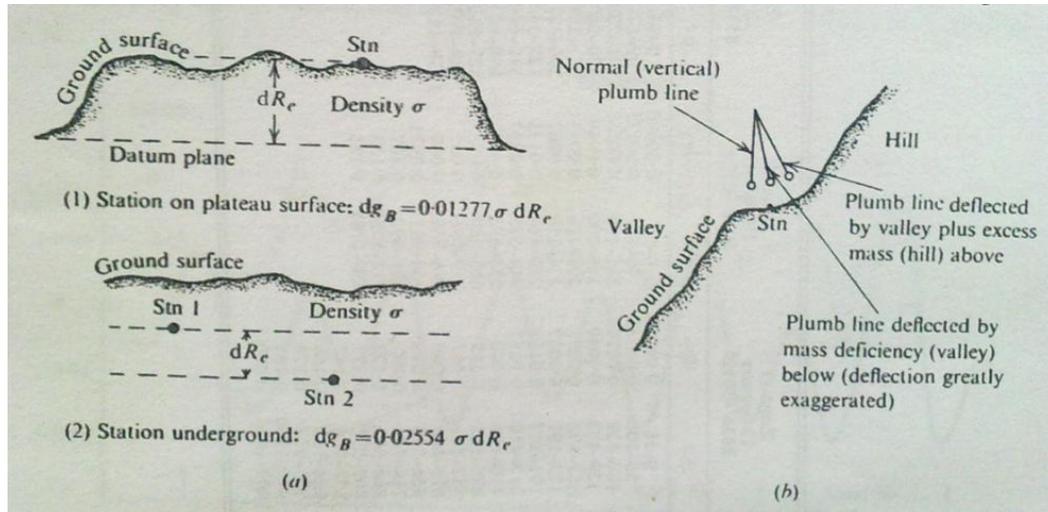
$\sigma$  = densidad del bloque.

Si asumimos un promedio de densidad para las rocas de la corteza de  $2.67 \text{ g/cm}^3$ , el valor numérico es:

$$\frac{dg_B}{dR_{eq}} = 0.0341 \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{pies}} \right] = 0.112 \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{metro}} \right] \quad (2.18b)$$

La corrección de Bouguer se aplica en el sentido opuesto a la corrección de aire libre, es decir, se resta cuando la estación está por encima del plano de referencia y viceversa.

Cuando la medición de la gravedad se hace en estaciones subterráneas, como en (Figura 1a), el bloque entre las estaciones 1 y 2 ejerce una atracción hacia abajo en la estación 1 y hacia arriba en la estación 2. Por lo tanto la diferencia de gravedad entre ellos es de  $4 \pi \gamma \sigma dR_e$ , es decir, la corrección de Bouguer es duplicada.



**Figura 1.- Correcciones de Gravedad. a).- Corrección de Bouguer. b).- Correcciones del terreno.**

La corrección de Bouguer y de Aire Libre, pueden ser combinadas. A partir de las ecuaciones (2.17) y (2.18b) donde el resultado es  $-0.060 \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{pies}} \right]$ , un conveniente, aunque no necesariamente confiables, mostrado en la figura.

Dos hipótesis que se hacen en la obtención de la corrección de Bouguer: en primer lugar el bloque es de densidad uniforme, en segundo lugar es de extensión horizontal infinita. Tampoco es realmente válido. Para modificar el primero, sería necesario tener un conocimiento considerable acerca de la geología local del lugar en cuanto al tipo de roca y las densidades aproximadas. Para el segundo, debemos tener cuidado con la siguiente reducción.

#### e).- Corrección por Terreno.

Esta corrección está diseñada para irregularidades de la superficie en las proximidades de la estación, que son, colinas que se levantan por encima de la estación de la gravedad y los valles (o la falta de material) por debajo de ella. De la (Figura 1b), es obvio que estas dos ondulaciones topográficas afectan las mediciones gravimétricas en el mismo sentido, la reducción de las lecturas debido a la atracción hacia arriba (colinas) o la falta de atracción hacia abajo (valles). Por lo tanto, en la corrección por terreno se añade siempre a la lectura de la estación.

#### f).- Corrección por marea de la Tierra.

Los instrumentos para medir la gravedad son bastante sensibles como para registrar los cambios en  $g$  causados por los movimientos del sol y la luna. Estas variaciones tienen amplitudes tan grandes como **0.3 (miligales)**. Al igual que las mareas, ellas dependen de

la altitud y del tiempo, aunque la amplitud del movimiento de la tierra es solo una fracción de las mareas.

A pesar del hecho de que este cambio en  $g$  es bastante significativo y puede ser calculado teóricamente para cualquier tiempo y lugar. Esto se debe a que la variación es suave y relativamente lenta; como resultado obtenido fácilmente en la corrección de la deriva del instrumento.

**g).- Isostasia y la corrección isostática.**

Si la corteza terrestre no tuvo variaciones laterales en densidad, nosotros encontraríamos un conjunto de lecturas de gravedad, después de las correcciones adecuadas para los efectos antes descritas, serían idénticas. Las diferencias en los valores corregidos constituyen una anomalía gravimétrica, conocida como la anomalía de Bouguer, que es el resultado de las variaciones laterales en la densidad. Escucha Leer fonéticamente D.

A partir de mediciones de gravedad en todo el mundo, se ha encontrado que la anomalía de Bouguer promedio en la tierra cerca del nivel del mar es aproximadamente cero. En zonas oceánicas es en general positiva, mientras que en regiones de gran elevación esto es principalmente negativo. Estos efectos de gran escala se deben a las variaciones de la densidad en la corteza e indica que el material bajo el océano es más denso de lo normal, mientras que en las regiones de las masas de tierra más elevadas es menos denso de lo normal.

Pratt sugirió una corteza flotando sobre un líquido uniforme, la densidad de la corteza variante con la topografía, siendo de menor densidad en las regiones montañosas y siendo de mayor densidad donde la corteza es delgada.

En general, sin embargo, la hipótesis de Pratt de la corteza inferior uniforme hace que la corrección isostática (que es en realidad una corrección del terreno a gran escala) sea más fácil de aplicar. Heiskanen ha presentado una forma modificada de la hipótesis, en la que combina una variación lateral de la densidad de la corteza terrestre con una variable de profundidad, además de un aumento gradual de la densidad con la profundidad.

El término Isostasia no se utiliza en relación con estas variaciones de la gravedad hasta el año de 1889, cuando se introdujo por primera vez por el geólogo C. E. Dutton. La Isostasia puede ser definida de dos formas:

- 1.- Una condición de la Tierra, tal que el ajuste continuo se realice para aproximar un equilibrio gravitacional.
- 2.- Una variación en la densidad de la corteza terrestre sistemáticamente relacionado con la superficie de las elevaciones.

La corrección isostática es la segunda más importante en la prospección gravimétrica, ya que pocas áreas de estudio serían lo suficientemente grandes como para requerir esta aplicación.

**h).- Anomalía gravimétrica de Bouguer.**

Cuando todas las correcciones anteriores se han aplicado a las lecturas de la gravedad, nosotros obtenemos el valor de la gravedad de Bouguer para la estación:

$$g_B = g_{obs} \pm dg_L + dg_{AL} - dg_B + dg_T \quad (2.20a)$$

En donde:

- $g_{obs}$  = lectura de la estación o lectura observada.
- $g_L$  = corrección por Latitud.
- $dg_{AL}$  = corrección por Aire Libre.
- $dg_B$  = corrección de Bouguer.
- $dg_T$  = corrección por Terreno.

Poniendo en valores numéricos, la ecuación (2.20a) se convierte en:

$$g_B = g_{obs} \pm dg_L + 0.094 h - (0.01277 h - T)\sigma \quad \text{para miligales/ft} \quad (2.20b)$$

$$g_B = g_{obs} \pm dg_L + 0.3085 h - (0.04188 h - T)\sigma \quad \text{para miligales/m} \quad (2.20b)$$

Donde  $dg_T$  es reemplazada por  $T\sigma$  (obviamente la densidad es la misma para ambas correcciones).

La anomalía de Bouguer,  $\delta g_B$ , es:

$$\delta g_B = g_B - g_r = g_{obs} \pm dg_L + dg_{AL} - dg_B + dg_T - g_r \quad (2.21a)$$

o, en forma numérica:

$$\delta g_B = g_B - g_r = g_{obs} \pm dg_L + 0.094 h - (0.01277 h - T)\sigma - g_r \quad \text{miligales/ft} \quad (2.21b)$$

$$\delta g_B = g_B - g_r = g_{obs} \pm dg_L + 0.3085 h - (0.04188 h - T)\sigma - g_r \quad \text{miligales/m} \quad (2.21b)$$

Donde  $g_r$  es generalmente un valor de la estación base en el área de estudio, más que un resultado teórico de la ecuación (2.15). Tenga en cuenta que los signos de  $dg_{AL}$  y  $dg_B$  cambian cuando la estación está por debajo del plano de referencia.

Otra cantidad que algunas veces se muestra en la literatura es la anomalía de Aire Libre; este es el valor de  $\delta g_B$  cuando  $dg_B$  y  $dg_T$  en la ecuación (2.21a) son omitidos. ...”

Esto nos da una idea a grandes rasgos de qué tipo de corrección se debe de realizar, dependiendo el lugar de estudio, para nuestro estudio, realizaremos una corrección de Bouguer simple, ya que tenemos la inexistencia de Topografía en el lugar o es muy pequeña y por lo tanto es despreciable, por lo que aplicaremos este tipo de corrección para nuestro estudio.

Ahora bien, en el mismo capítulo de Métodos Gravimétricos de W. M. Telford, también nos habla acerca del valor de la densidad de las rocas y de los minerales, que son descritos como:

**Densidad de las rocas.**

**a).- General.**

El parámetro importante en la exploración de la gravedad (la fuente anómala) es una variación local de la densidad. Dos problemas surgen en relación con este parámetro.

La máxima variación de la densidad de diferentes rocas, entre rocas y minerales es de aproximadamente dos. Este es un cambio muy pequeño comparado al rango de la susceptibilidad magnética (aproximadamente de  $10^5$ ), la conductividad eléctrica (aproximadamente de  $10^{10}$ ), a la radiactividad (aproximadamente 100) e incluso las propiedades elásticas ó la velocidad de la onda acústica (10-20).

Por lo tanto, es necesario hacer mediciones de densidad en el laboratorio para pequeñas muestras de afloramiento o en pequeñas muestras de núcleos de perforación. Sin embargo, los resultados de laboratorio no necesariamente son para obtener la densidad real de la formación, ya que las muestras pueden ser degradadas y fragmentadas o deshidratadas.

En consecuencia, la densidad, que es, por supuesto, lo más importante, por lo general no es muy bien conocido en un campo en particular. Por esta razón, es práctico para reunir y tabular la densidad de las rocas y minerales en algunos detalles.

**b).- Rocas Sedimentarias.**

Estas tienen en promedio, densidades más bajas que las rocas ígneas y metamórficas. Entre los sedimentos de la densidad promedio, varía con la composición, siendo más bajo para un conglomerado y la arenisca, seguido de la lutita, piedra caliza y dolomita, en ese orden, sin embargo, valores actuales difieren ampliamente del promedio, por lo tanto, hay una considerable superposición.

Esta amplia variedad en densidades es debida fundamentalmente a las variaciones en la porosidad de las rocas sedimentarias. Además, los fluidos de poro pueden afectar la densidad hasta en un 10%. Por lo tanto, como se mencionó anteriormente, las mediciones de densidad de laboratorio deben hacerse, si es posible, con la muestra en las mismas condiciones en las que prevalecen en la formación de la que fue removida. Esto requiere información sobre el clima regional y la ubicación de la capa freática, si la formación está cerca de la superficie.

La densidad de las rocas sedimentarias es también influenciada por su edad, por los antecedentes históricos y por la profundidad bajo la superficie. Obviamente una roca porosa enterrada bajo una carga pesada, será compactada y consolidada en un grado que depende del tamaño y la duración de la carga. Por lo tanto, la densidad incrementa con la profundidad y el tiempo. Este efecto es más pronunciado en arcillas y lutitas que en areniscas y calizas.

La tabla 1, es una lista de densidades para varios sedimentos, rocas sedimentarias y el rango de densidad aproximada para cada tipo. Cabe señalar que el contraste de densidad normal entre formaciones sedimentarias adyacentes en el campo es rara vez más de  $0.25 \text{ g/cm}^3$ , mucho menos que el máximo posible, lo indicado por el rango de la tabla. Es evidente que está conectado con la historia geológica de la región.

Tipo de Roca	Intervalo ( $\text{g/cm}^3$ )	Promedio (humedad)	Intervalo ( $\text{g/cm}^3$ )	Promedio (seco)
Aluvión	1.96 – 2.0	1.98	1.5 – 1.6	1.54
Arcillas	1.63 – 2.6	2.21	1.3 – 2.4	1.70
Acumulación glacial	---	1.80	---	---
Gravas	1.7 – 2.4	2.0	1.4 – 2.2	1.95
Loess	1.4 – 1.93	1.64	0.75 – 1.6	1.20
Arenas	1.7 – 2.3	2.0	1.4 – 1.8	1.60
Arenas y Arcillas	1.7 – 2.5	2.1	---	---
Limo	1.8 – 2.2	1.93	1.2 – 1.8	1.43
Suelos	1.2 – 2.4	1.92	1.0 – 2.0	1.46
Areniscas	1.61 – 2.76	2.35	1.6 – 2.68	2.24
Lutitas	1.77 – 3.2	2.40	1.56 – 3.2	2.10
Calizas	1.93 – 2.90	2.55	1.74 – 2.76	2.11
Dolomitas	2.28 – 2.90	2.70	2.04 – 2.54	2.30

**Tabla 1.- Densidad de Sedimentos y Rocas Sedimentarias.**

**c).- Densidad de minerales no metálicos y de varios productos.**

Con algunas excepciones, los minerales no metálicos son de menor densidad que el promedio de las rocas ( $2.67 \text{ g/cm}^3$ ). Los minerales metálicos, por el contrario, son principalmente los más pesados que el promedio, pero como rara vez se producen en grandes volúmenes puros, su contraste de densidad positiva normalmente no tan grande como el máximo teórico.

La siguiente tabla 2 y 3, nos muestra una lista de densidades de varios materiales y minerales.

Tipos	Intervalo ( $\text{g/cm}^3$ )	Promedio
Nieve	---	0.125
Petróleo	0.6 – 0.9	---
Hielo	0.88 – 0.92	---
Agua de mar	1.01 – 1.05	---
Turba	---	1.05
Asfalto	1.1 – 1.2	---
Lignito	1.1 – 1.25	1.19
Hulla	1.2 – 1.5	1.32
Antracita	1.34 – 1.8	1.50
Ladrillo	---	1.50
Carnalita	1.6 – 1.7	---
Azufre	1.9 – 2.1	---
Tiza	1.53 – 2.6	2.01
Grafito	1.9 – 2.3	2.15
Roca de sal	2.1 – 2.6	2.22

Tipos	Intervalo ( $\text{g/cm}^3$ )	Promedio
Yeso	2.2 – 2.6	2.35
Bauxita	2.3 – 2.55	2.45
Caolinita	2.2 – 2.63	2.53
Ortoclasa	2.5 – 2.6	---
Cuarzo	2.5 – 2.7	2.65
Calcita	2.6 – 2.7	---
Talco	2.7 – 2.8	2.71
Anhidrita	2.9 – 3.0	2.93
Biotita	2.7 – 3.2	2.92
Magnesita	2.9 – 3.12	3.03
Fluorita	3.01 – 3.25	3.14
Epidota	3.25 – 3.5	---
Diamante	---	3.52
Corindón	3.9 – 4.1	4.0
Barita	4.3 – 4.7	4.47

**Tabla 2.- Densidad de Minerales no metálicos y de varios productos.**

Mineral	Intervalo (g/cm <sup>3</sup> )	Promedio	Tipo de Roca	Intervalo (g/cm <sup>3</sup> )	Promedio
Cobre	---	8.7	Sulfuros, Arseniuros		
Plata	---	10.5	Esfalerita	3.5 – 4.0	3.75
Oro	15.6	---	Covelita	---	3.8
Óxidos, Carbonatos			Malaquita	3.9 – 4.03	4.0
Limonita	3.5 – 4.0	3.78	Calcopirita	4.1 – 4.3	4.2
Siderita	3.7 – 3.9	3.83	Estanita	4.3 – 4.52	4.4
Manganita	4.2 – 4.4	4.32	Estibnita	4.5 – 4.6	4.6
Cromita	4.3 – 4.6	4.36	Pirrotita	4.5 – 4.8	4.65
Ilmenita	4.3 – 5.0	4.67	Marcasita	4.7 – 4.9	4.85
Pirolusita	4.7 – 5.0	4.82	Pirita	4.9 – 5.2	5.0
Magnetita	4.9 – 5.2	5.12	Bornita	4.9 – 5.4	5.1
Franklinita	5.0 – 5.22	5.12	Millerita	5.3 – 5.65	5.4
Hematita	4.9 – 5.3	5.18	Calcosina	5.5 – 5.8	5.65
Cuprita	5.7 – 6.15	5.92	Cobaltita	5.8 – 6.3	6.1
Casiterita	6.8 – 7.1	6.92	Arsenopirita	5.9 – 6.2	6.1
Wolframita	7.1 – 7.5	7.32	Esmaltita	6.4 – 6.6	6.5
Uraninita	8.0 – 9.97	9.17	Argentita	7.2 – 7.36	7.25
			Niquelita	7.3 – 7.67	7.5
			Galena	7.4 – 7.6	7.5
			Cinabrio	8.0 – 8.2	8.1

**Tabla 3.-** Densidad de Minerales no metálicos y de varios productos.

Con la ayuda de la teoría, las tablas y las aplicaciones encontradas en este antecedente, nos ayudará en gran medida para nuestro estudio, así como el conocer la anomalía de la zona sur del cráter de Chicxulub, como se obtienen los datos más óptimos para el desarrollo y la obtención de modelos confiables, que permitan la interpretación de la zona.

El antecedente de los autores (Hurtado-Cardador, Urrutia-Fucugauchi et al. 2006) analizado, previo al desarrollo de este proyecto de investigación, nos describe el estudio de la prospección gravimétrica, la georeferenciación y la reducción de los datos, así como la integración regional de los estudios gravimétricos, el cual genera gradientes y anomalías falsas en los mapas de anomalías de Bouguer en los límites de los estudios conectados por las diferentes estaciones base utilizadas.

### Base de referencia en estudios gravimétricos regionales

El objetivo principal de este estudio es adjuntar todos los estudios gravimétricos de Pemex a una nueva red de estaciones base de gravedad de primer orden, con el fin de eliminar los problemas de los gradientes y las anomalías falsas. Un segundo objetivo es establecer una red de estaciones permanentes de la gravedad de base (BGP), que se refiere a una sola base del Sistema Mundial de la gravedad. Cuatro circuitos regionales de BGP cubren ocho estados de México, el cual se estableció para apoyar el vínculo de las estaciones base de la gravedad local de cada uno de los estudios gravimétricos situados en las proximidades de estos circuitos. El tercer objetivo es añadir las constantes de la gravedad, medidas, así como de los cálculos, para cada uno de los 265 estudios gravimétricos para sus archivos correspondientes de base de datos de Pemex y del Instituto Mexicano del Petróleo.

Este estudio nos ayuda a adjuntar todos los estudios gravimétricos de Pemex (Petróleos Mexicanos, 1990, 1994) para una nueva red de estaciones base de gravedad de primer orden, con el fin de eliminar los problemas de los gradientes y las anomalías falsas. Un segundo objetivo es establecer una red de

estaciones permanentes de la gravedad de base, que se refiere para una sola base del Sistema Mundial de la Gravedad.

El siguiente artículo de antecedente que tenemos para este estudio es del autor (Holom D., Oldow J. et al. 2007), que nos explica la utilización de las normas actuales para la reducción de la gravedad observada para un modelo de Anomalía de Bouguer, así como del manejo de programas comerciales y hojas de cálculo de investigación académica disponible en internet para su libre descarga.

### **Reducción de datos**

El uso de las nuevas normas establecidas por el Servicio Geológico de Estados Unidos y del Comité de América del Norte, han desarrollado una hoja de cálculo para la reducción de datos sin procesamiento para la anomalía de Bouguer y con el uso de la corrección del terreno, la anomalía de Bouguer completa. La reducción se basa en la altura elipsoidal. Incluido en el paquete de reducción de datos que es un programa de transformación de estudios geodésicos de Estados Unidos que permite la restauración de las lecturas de altura ortométrica (típico de los datos existentes) para la altura elipsoidal. La hoja de cálculo está disponible para descargarse gratuitamente en la Sociedad Geológica de América o de [geongrid.org](http://geongrid.org). La hoja de cálculo es particularmente útil para el campo de la reducción de datos y modelado, donde el acceso a Internet es limitado o inexistente.

Este artículo nos da un panorama de la utilización de hojas de cálculo de la gravedad, la cual es gratis y proporciona una herramienta sencilla para la reducción de la gravedad de datos crudos para las Anomalías de Bouguer, todo de conformidad con las normas establecidas por el USGS y del Comité de base de datos de gravedad de América del Norte. La hoja de cálculo elimina la necesidad de acceso a Internet, que permite al usuario calcular la anomalía de Bouguer de una estación de gravedad en el campo.

El siguiente antecedente realizado por los autores (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010), explican la geología del lugar, las estructuras del cráter en la zona central y en sus extremos, así como de su modelo en tres dimensiones de anomalías magnéticas, sus distancias radiales, las fuentes de las anomalías magnéticas y algunos estudios de núcleos de perforación.

### **Modelado aeromagnético y Fuentes (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi, 2010).**

La información inicial sobre la litología y la estructura del subsuelo del cráter se deriva de estudios geofísicos y del programa de perforación de exploración petrolera llevada a cabo por la Compañía Mexicana de Petróleo (PEMEX). Los análisis de los registros geofísicos y petrografía en muestras documentadas de núcleos recuperados, la presencia de unidades ígneas de textura que se interpretaron juntamente con los estudios geofísicos en términos de un campo volcánico enterrado en la plataforma carbonatada en el noreste NE de Yucatán (López-Ramos, 1976). Estos pozos se encuentran fuera del borde del cráter en el sector sur, el muestreo de diferentes distancias del centro del cráter en el puerto Chicxulub. Los pozos UNAM-5, UNAM-6 y UNAM-7, aproximadamente en las distancias 110, 125 y 150 kilómetros

radiales respectivamente. Las brechas de impacto en el interior del borde del cráter se han quitado del pozo Yaxcopoil-1, que se encuentra a unos 62 kilómetros del centro del cráter.

Se aplican a los datos del campo magnético sobre el cráter Chicxulub, para determinar y documentar las principales fuentes de anomalía magnética, así como de la estructura del cráter en la zona central. Los datos aeromagnéticos sobre la estructura revelan tres patrones fuertes, concéntricos bien definidos, con una zona central de diámetro de 40 kilómetros de anomalías de gran amplitud. Los resultados indican que las fuentes magnéticas se extienden a una distancia radial de aproximadamente 45 kilómetros del centro de la estructura con profundidades medias que oscilan entre 2 y 4 kilómetros. Las fuentes de las anomalías magnéticas en la zona central del levantamiento estructural se encuentran en el rango de 3.5 a 8 kilómetros de profundidad, con contribuciones dominantes de un cuerpo aparentemente elevado que forman el levantamiento del basamento.

La anomalía del campo aeromagnético sobre el cráter de Chicxulub muestra anomalías de gran amplitud sobre el sector central de la estructura. Los datos aeromagnéticos fueron recogidos por el sector de exploración de PEMEX en la península de Yucatán y se compone de una cuadrícula con espaciamiento de vuelos de líneas de seis kilómetros las cuales son perpendiculares, volando a una altitud de 450 metros, estas mediciones de datos a lo largo del registro y las líneas de unión son casi continuas, dando muestras de alta densidad.

De este artículo podemos enfocarnos a una serie de principales ideas, las cuales nos da un amplio panorama del método empleado en cada una de las investigaciones de este artículo para determinar la composición litológica y estructural del cráter de Chicxulub.

El siguiente antecedente que tenemos para este estudio, de los autores (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2011), se publicó entre Enero y Marzo del 2011, en este artículo nos explican los rasgos geológicos, los cambios climáticos debidos al impacto del bólido, los rasgos topográficos, las dimensiones del cráter Chicxulub, las características de la plataforma carbonatada, así como de la formación del cráter, entre otros datos importantes. En este trabajo, se revisan los estudios geofísicos y los programas de perforación en el cráter de Chicxulub que se llevó a cabo en las últimas décadas y brevemente sus implicaciones para la investigación en una amplia gama de temas, desde los cráteres de impacto y las extinciones en masa como de los efectos paleoclimáticos y paleoambientales de los grandes impactos.

El cráter Chicxulub, parte de un grupo selecto de rasgos geológicos, es una gran herramienta para investigar los procesos de formación de cráteres y los efectos de impactos en el planeta. Chicxulub es uno de tres cráteres complejos de multi-anillos documentados en el registro terrestre, el impacto es relacionado a los cambios ambientales y climáticos que marcan la frontera entre el Cretácico-Paleógeno (K-Pg) y las extinciones masivas de organismos. El cráter, localizado en la porción noroeste NW de la península de Yucatán, está cubierto por sedimentos carbonatados y fue identificado inicialmente en los estudios dentro del programa de exploración de Petróleos Mexicanos. En la superficie, evidencias del cráter sepultado incluyen al anillo de cenotes y rasgos topográficos semi-circulares, los cuales se asocian a la

compactación diferencial de los materiales fragmentados en el impacto y que forman parte del relleno de la estructura.

Las características de la plataforma carbonatada, que no ha sido afectada por actividad tectónica o volcánica reciente, permiten tener mayor resolución en los estudios geofísicos e investigar la estructura del cráter con una alta precisión.

La corteza inferior y manto superior son deformados, se tiene un levantamiento en la parte central de la excavación de varias decenas de kilómetros que forman un levantamiento de basamento que caracteriza a estos cráteres complejos. La zona de impacto es deformada y fracturada. Los estudios de la dinámica del impacto, la formación del cráter, los efectos globales de la liberación de energía, las ondas sísmicas y los modelados del comportamiento de materiales sujetos a altas presiones y temperaturas forman parte de los problemas en estudio, representando retos interesantes en geociencias.

La capa de material expulsado con el material fragmentado identificada como la capa (K-Pg), constituye un marcador estratigráfico a escala global, permitiendo correlaciones estratigráficas y análisis de procesos en la transición del Mesozoico al Cenozoico. En los últimos 20 años las investigaciones han aportado información importante sobre el cráter Chicxulub y los eventos que marcan la frontera (K-Pg), sin embargo, son las preguntas formuladas a partir de los estudios quizá la parte más relevante.

Se analizaron las bases de datos disponibles de objetos cruzando la Tierra y el registro de cráteres terrestres. El tamaño del cráter de impacto resultante se estima en aproximadamente 200 kilómetros de diámetro. En ese momento, sólo tres cráteres se conocían que son mayores a los 100 kilómetros de diámetro, el Vredefort, el Sudbury y el Popigai, que no fueron considerados como posibles candidatos para el impacto debido a la edad de su formación.

(Hildebrand, Penfield et al. 1991), resume los estudios sobre el cráter de Chicxulub proponiendo como candidato para el límite del sitio de impacto el límite del periodo en (K-Pg). Estudios posteriores sobre litologías de impacto recuperadas por los programas de perforación llevadas a cabo por Petróleos Mexicanos (PEMEX), proporcionaron la confirmación sobre el origen de la estructura de impacto y de su edad en el límite de K-Pg (Sharpton, Brent D. G. et al. 1992); (Swisher III C.C., Grajales-Nishimura J.M. et al. 1992); (Urrutia-Fucugauchi, Marin et al. 1994). El impacto de Chicxulub quedó relacionado con todo el mundo por su distribución en una capa de arcilla rica en iridio, que ha sido marcada estratigráficamente como el límite (K-Pg). El cráter Chicxulub se convirtió en un componente fundamental para la teoría de impacto, no solo proporciona evidencia de apoyo, pero ayuda para la apertura de nuevas vías de investigación sobre los cráteres de impacto, los efectos ambientales de los impactos, los mecanismos de muerte por impacto de bólidos, la extinción de seres vivos, la evolución, el petróleo y los depósitos minerales, así como del papel que juegan los impactos en el sistema solar.

En este artículo también nos describe parte muy importante acerca de la localización y la estructura del cráter de impacto Chicxulub.

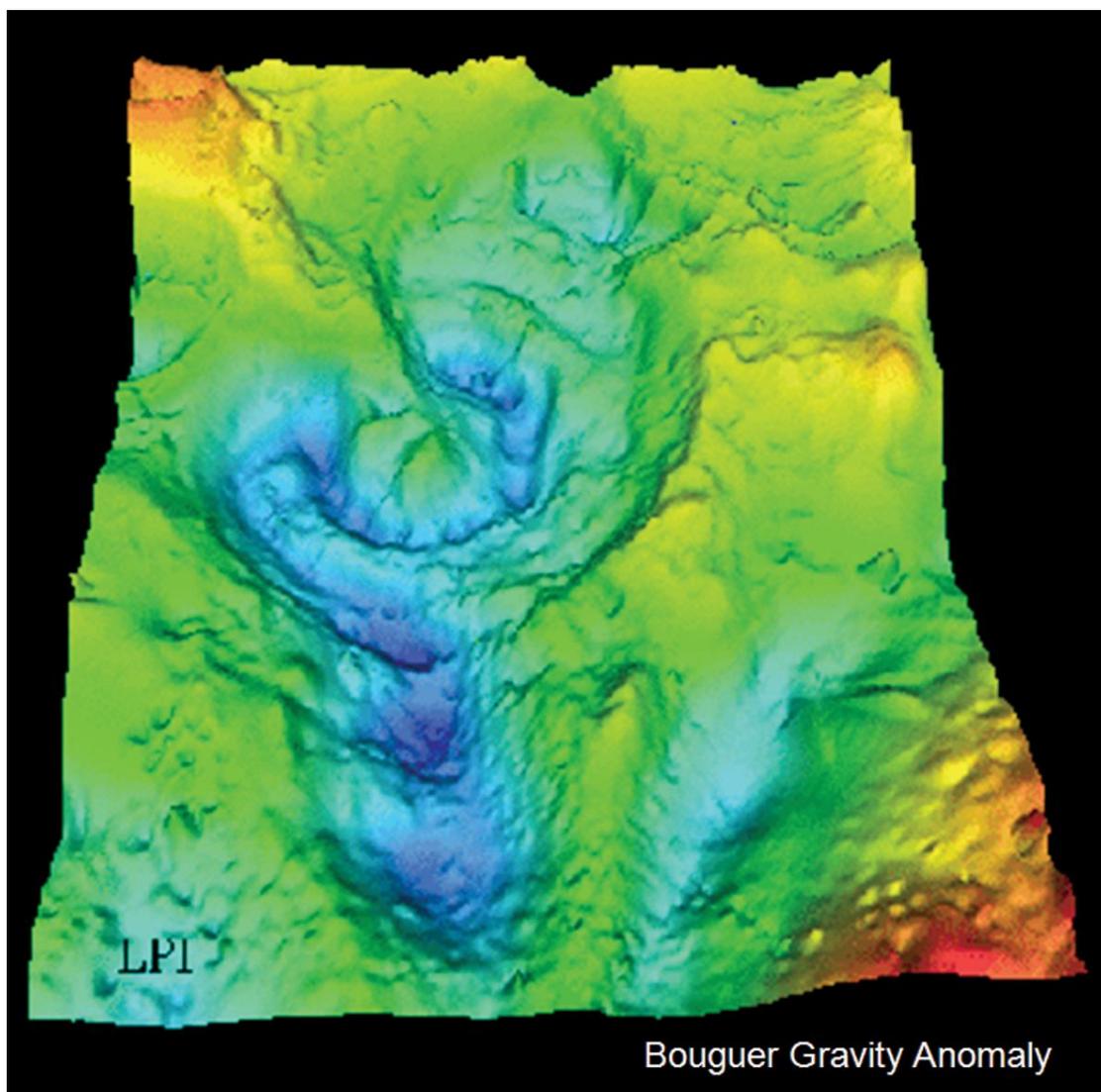
### **Cráter de Impacto Chicxulub.**

El cráter de Chicxulub se encuentra en la plataforma carbonatada de Yucatán, en el sur del Golfo de México. La estructura se encuentra la mitad en alta mar y la otra mitad en las tierras cubiertas por sedimentos de carbonato, con el centro geométrico aproximado a la costa del puerto de Chicxulub.

La estructura enterrada se exploró con un programa de perforación a partir de la década de 1950, que proporcionan datos sobre la estratigrafía del subsuelo (López Ramos, 1975). Los pozos perforados dentro de la anomalía geofísica, recuperaron muestras de las rocas ígneas de composición andesítica, que se tomaron como la confirmación de un origen volcánico de las estructuras enterradas en la plataforma carbonatada. Los resultados del programa de exploración no mostraron indicios de yacimientos petroleros y gas en la zona.

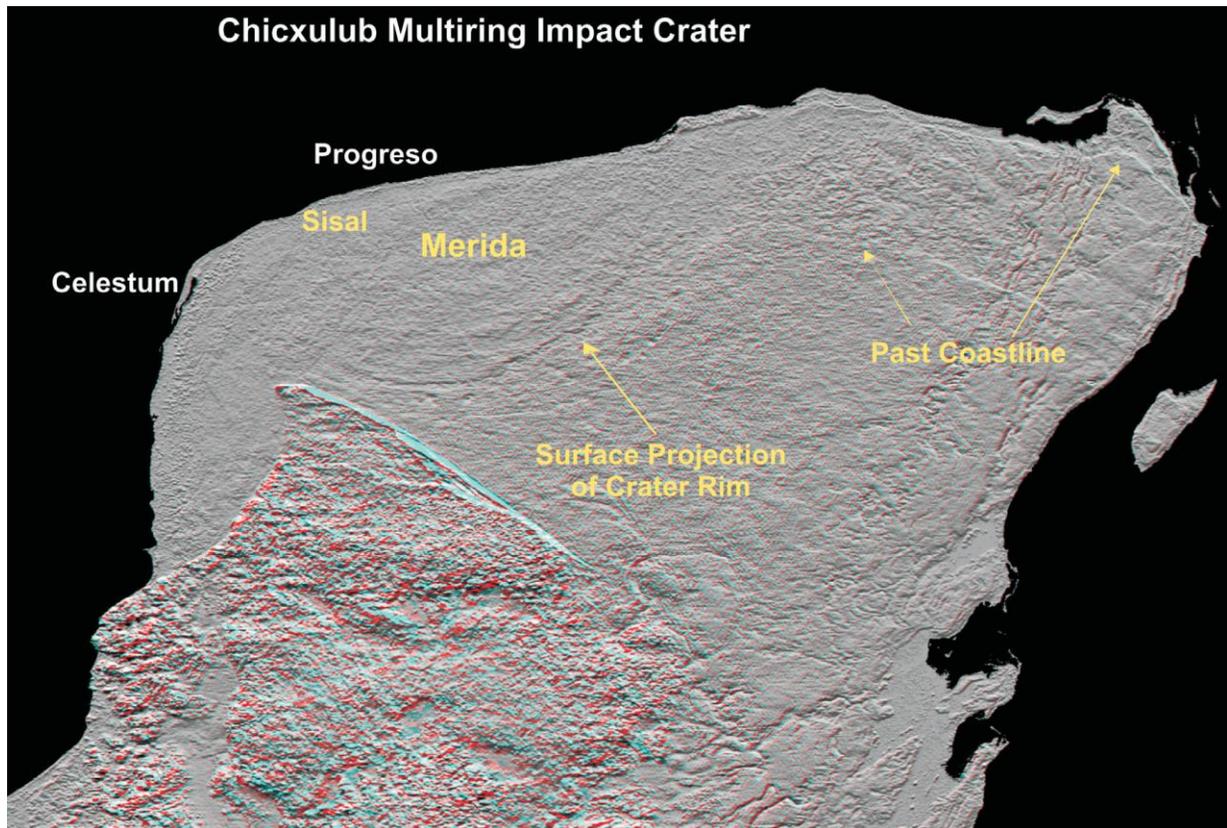
Mayores esfuerzos en la exploración incluyen estudios aeromagnéticos que muestran incidencias de anomalías magnéticas de gran amplitud localizadas en la zona central de la anomalía gravimétrica semi-circular, lo que permitió a Pentfield y Camargo-Zanoguera (1981) proponer un origen de impacto alternativo para la estructura enterrada. La interpretación de la estratigrafía del subsuelo, sugiere una edad del Cretácico Superior para el cuerpo andesítico (López Ramos 1975).

La morfología y el tamaño del cráter fueron inferidos de los datos gravimétricos y magnéticos, con una anomalía de Bouguer aproximadamente de (-30 miligales) centrada cerca de la línea de costa del puerto de Chicxulub (Hildebrand, Penfield et al. 1991). La geometría del cráter se estimó a partir de las anomalías de gravedad que muestran un radio central alto de aproximadamente 20 kilómetros y una anomalía gravimétrica de aproximadamente 20 miligales, así como de radios internos concéntricos bajos de aproximadamente 35 y 60 kilómetros, respectivamente (Figura 2). Dos perfiles de gravedad regional muestran la anomalía de Bouguer negativa en toda la estructura, donde se comparó con las anomalías de gravedad sobre el cráter de Manicouagan (este enorme cráter se encuentra al norte de Canadá y es el resultado del impacto de un meteorito que cayó hace aproximadamente 200 millones de años, más o menos a finales del Triásico. En su origen tenía unos 100 kilómetros de diámetro que tras la erosión sufrida por el paso del tiempo ha dejado una forma anular de 72 kilómetros de diámetro. Actualmente se aprovecha el lago formado para la alimentación de una central hidroeléctrica), que mostró características similares que del cráter de Chicxulub. No se reportaron modelos geofísicos, y el análisis de estratigrafía del subsuelo fue realizada con referencia a los datos de perforación y de una línea sísmica de reflexión multicanal, que mostró un reflector aproximadamente a 1.5 kilómetros de profundidad, que provisionalmente se correlaciona con el límite del K-Pg.



**Figura 2.-** Representación oblicua en 3-D del mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer en el cráter de Chicxulub (Sharpton et al., 1993). Presencia de una anomalía circular concéntrica máxima en la zona central.

Los estudios abordaron otros interesantes temas relacionados, como la relación del impacto en Chicxulub con el límite del depósito (K-Pg) en el Caribe, el sur de los Estados Unidos y el Noreste de México, y con la capa global de material expulsado del cráter (Hildebrand, Penfield et al. 1991); (Alvarez, Smith et al. 1992); (Urrutia-Fucugauchi 1993); (Kamo and Krogh 1995). Los estudios vuelven a examinar la geología y la geomorfología de la península de Yucatán. En la península de Yucatán, no existen afloramientos de superficie de litologías de impacto, y la presencia de la estructura enterrada indica una depresión topográfica semi-circular de amplitud baja que puede observarse en imágenes de satélite (Figura 3).



**Figura 3.-** Imagen satelital de interferometría de radar de alta resolución para el norte de la península de Yucatán. La proyección de la superficie del borde del cráter se caracteriza por una depresión topográfica semi-circular, que coincide con el anillo de cenotes en el terreno plano cárstico. La depresión topográfica es asociada con la compactación diferencial de brechas de impacto en el interior del cráter, en relación a la secuencia de carbonatos. Tenga en cuenta la presencia de las líneas de costa antiguas que reflejan el cambio del nivel del mar al paso del tiempo (Chavez-Aguirre, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008). Imagen del mapa base de la interferometría de radar de banda C, Shuttle Radar Topography Mission Tierra (Cortesía de NASA / JPL-Caltech).

El borde estructural enterrado se marca en la superficie como resultado de la compactación diferencial de las brechas de impacto y las fracturas, así como de la disolución mejorada a través de fracturas en el terreno de la piedra caliza.

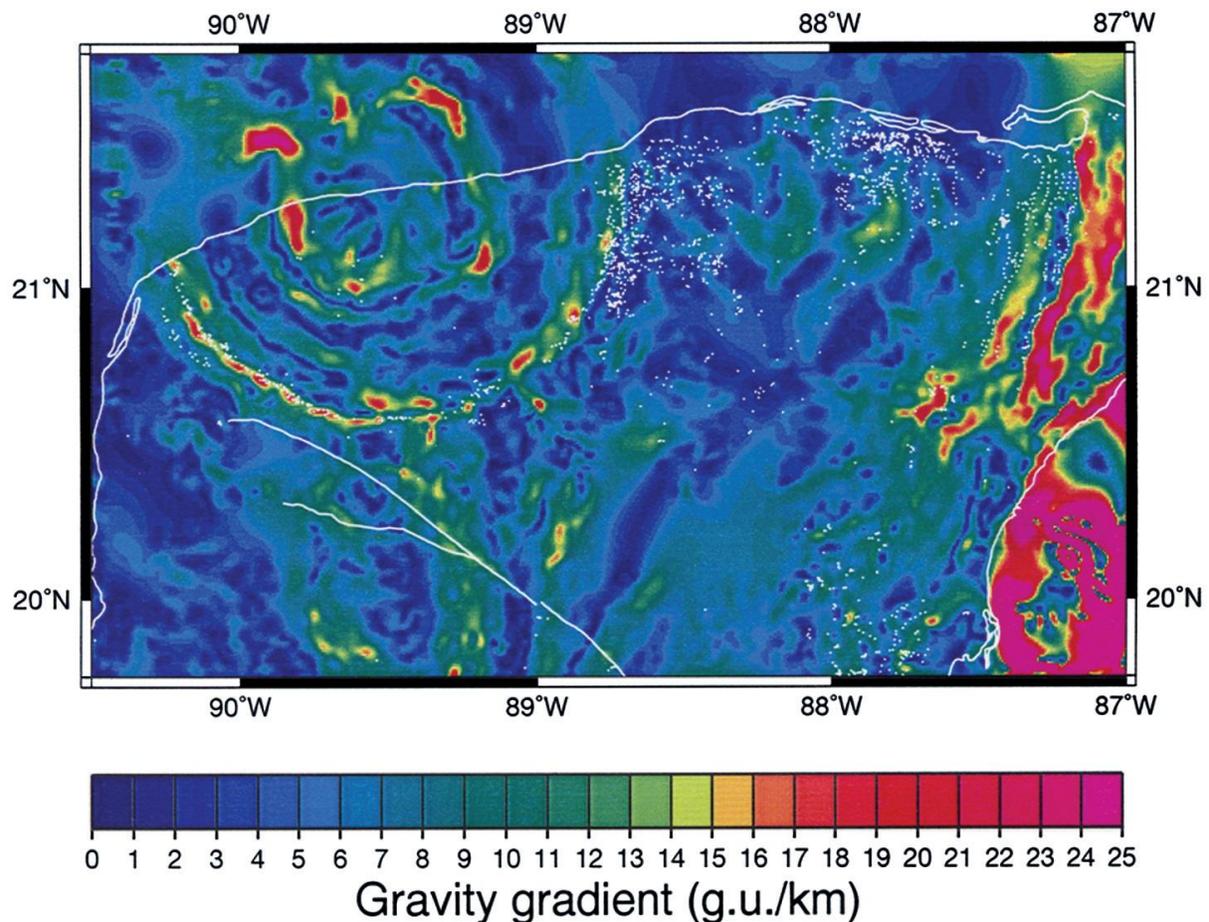
La estructura, el tamaño y la morfología de la estructura de Chicxulub se han investigado en las últimas dos décadas, usando la gravedad, el magnetismo, los métodos magnetoteléuricos y los métodos de reflexión sísmica, así como de los registros de pozos de perforación y los programas de muestreo continuo. Las propiedades petrofísicas de las rocas y las litologías de impacto, se han determinado por registros geofísicos y muestras de núcleo. Las litologías de impacto han sido estudiadas por la petrología, la geoquímica, el microscopio y de los análisis isotópicos. La estratigrafía y la edad del impacto han sido estudiadas a partir de la información de pozo, la datación radiométrica, bioestratigrafía, la estratigrafía secuencial, la polaridad magnética y los estudios de isótopos estables.

Este antecedente también nos indica sobre los modelos Geofísicos obtenidos por los diferentes métodos para el estudio del cráter de impacto Chicxulub.

### **Modelos Geofísicos**

El cráter ha sido fotografiado usando los datos geofísicos de los estudios en Tierra, aire y mar. Las anomalías de gravedad en Chicxulub se definen a partir de la integración de estudios, incluyendo los estudios sobre la tierra desde la década de 1940, que cubría una parte importante de la península (Penfield, Camargo-zanoguera et al. 1981), como los estudios marinos y los estudios de aerogravimetría. Los datos aerogravimétricos fueron recogidos en alta mar y sobre el sector oeste W, el procesamiento del estudio muestra las líneas orientadas N-NW y W-SW (Hildebrand, Pilkington et al. 1998). Estos datos han sido complementados con otros estudios llenando espacios de áreas, incluyendo la zona marítima terrestre.

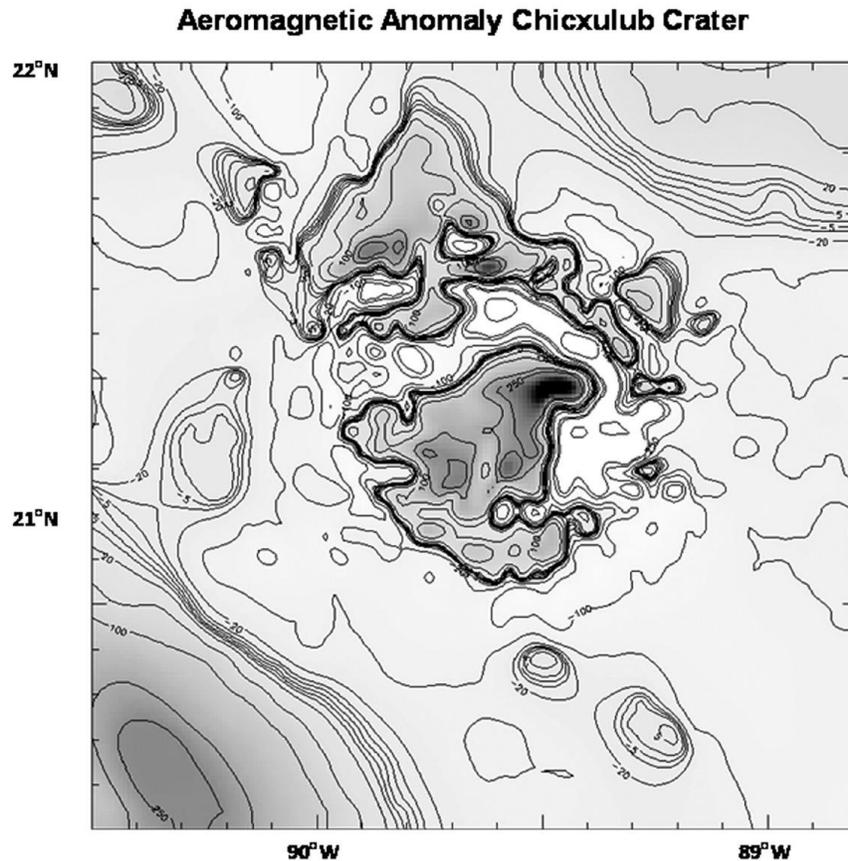
La anomalía gravimétrica de Bouguer muestra una gran anomalía concéntrica semi-circular bien definida con amplitudes de hasta 30 miligales con un alto central de 40 kilómetros de diámetro y dos bajos en 70 y 120 kilómetros diámetro respectivamente (Figura 2). Las anomalías concéntricas semi-circulares fueron inferidas de 52.5±5 kilómetros, 77.1±6.3 kilómetros, 99.6±6 kilómetros y 139±11 kilómetros de distancia radial, que definen la estructura de multi-anillo con un pico de anillo central limitada por el anillo 1. Los anillos 2 y 3 fueron interpretados como los límites internos y externos de la pared del cráter transitorio, con un borde de la cuenca externa dada por el anillo 4 (Sharpton, Brent D. G. et al. 1992). (Hildebrand, Pilkington et al. 1998) y (Connors, Hildebrand et al. 1996) utilizaron el gradiente horizontal para investigar sobre las características concéntricas, mirando los gradientes de las zonas más pronunciadas con un centro aproximado en 21° 20.195' Norte y 89° 45.896' Oeste (Figura 4).



**Figura 4.-** Gradiente de la gravedad horizontal calculado para la anomalía gravimétrica de Bouguer en el cráter Chicxulub (tomado del Connors et al., 1996). Los puntos blancos representan la ubicación de los cenotes. Observe la correlación del anillo de cenotes con la anomalía del gradiente de gravedad.

El mapa del gradiente horizontal define dos anillos concéntricos de anomalías positivas, el anillo interno delimita la zona de elevación central y el anillo exterior relacionado con el anillo de cenotes. La distribución del cenote muestra algunas desviaciones de los sectores circulares de aproximadamente 3 kilómetros, y la aparición de características de menor desarrollo semi-circular que corresponden a anillos parciales secundarios, sobre todo en los sectores oeste y central.

El campo aeromagnético sobre el cráter Chicxulub (Figura 5) muestra anomalías dipolares de gran amplitud en el sector central de la estructura (Penfield, Camargo-zanoguera et al. 1981); (Pilkington, Hildebrand et al. 1994). El campo de la anomalía se calcula a partir del campo magnético total, con la resta de un valor de contenido regional de 48.380 nanoTeslas. (Hildebrand, Penfield et al. 1991), describe el campo de anomalía que se extiende sobre aproximadamente 210 kilómetros de la zona circular de anomalías bipolares, caracterizada por grandes gradientes horizontales y de ásperos patrones concéntricos alrededor de la correlación con el patrón de la gravedad.



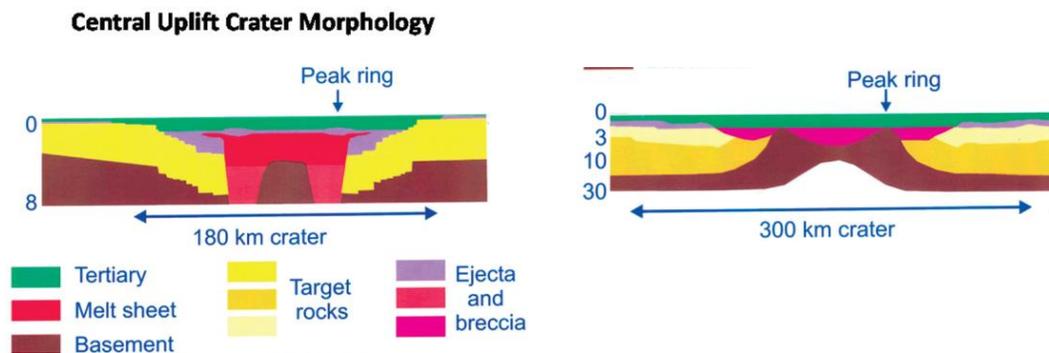
**Figura 5.-** Mapa del contorno del campo de anomalía aeromagnética sobre el cráter de impacto Chicxulub, en el sector noroeste NW de la península de Yucatán. Datos aeromagnéticos provenientes de los registros de exploración petrolera de PEMEX en la península de Yucatán y el sur del Golfo de México. Registros de vuelo a 500 metros sobre el nivel del mar. Las curvas de nivel se dan en nanoTeslas. Observe las anomalías de gran amplitud sobre el sector central del cráter Chicxulub (Ortiz-Alemán y Urrutia-Fucugauchi, 2010).

Las anomalías aproximadamente a 35 kilómetros de distancia radial entre las amplitudes de gravedad central, muestran un elevado tamaño (hasta 1000 nanoTeslas) y longitudes de onda corta. Las anomalías magnéticas de pequeña amplitud (5 a 20 nanoTeslas), las longitudes de ondas cortas se extienden sobre un área más amplia, algunos aproximadamente de 105 kilómetros de distancia radial. (Penfield, Camargo-zanoguera et al. 1981), estiman la profundidad para las fuentes magnéticas profundas cerca de 1.1 kilómetros, apoyándose en las estructuras del cráter debajo de la cubierta sedimentaria Paleógena.

Las anomalías inversas dipolares en la zona central indican fuentes con magnetización de polaridad inversa. Análisis posteriores separan el campo de la anomalía magnética en tres amplias estructuras concéntricas, asociadas a la geometría del cráter y posibles cuerpos de origen. El centro concéntrico de la anomalía magnética coincide aproximadamente con la anomalía de la gravedad y la distribución del hundimiento del anillo semi-circular (Pilkington, Hildebrand et al. 1994); (Hildebrand, Pilkington et al. 1998).

A pesar de los altos contrastes en las propiedades físicas es probable la caracterización de los carbonatos, rocas fundidas, brechas de impacto y del basamento, la construcción de modelos de alta resolución, el uso de métodos inversos y directos se limitan por la falta de datos sobre las propiedades físicas. Para el modelado de la interpretación de anomalías magnéticas, la susceptibilidad limitada y las mediciones de magnetización remanente, así como de los modelos magnéticos sugieren contrastes magnéticos de tercer a cuarto orden de magnitud con respecto a los carbonatos y evaporitas (Hildebrand, Penfield et al. 1991); (Urrutia-Fucugauchi, Marin et al. 1994); (Urrutia-Fucugauchi, Morgan et al. 2004). El modelado magnético indica que las rocas fundidas o derretidas, las brechas de impacto y el levantamiento central, son los principales contribuyentes. Siguiendo esto (Pilkington et al., 1994) y (Pilkington y Hildebrand, 2000), proponen que las anomalías dipolares aisladas con amplitudes grandes (mayores a 100 nanoTeslas) y de longitudes de onda corta de la zona intermedia asociados con la magnetización de polaridad inversa, están relacionadas con brechas ricas en vidrio y rocas fundidas. El levantamiento central se caracteriza por una anomalía de polaridad inversa de alta amplitud (mayor a 500 nanoTeslas), que está asociada a las rocas fundidas, como brechas y basamento derretido (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010).

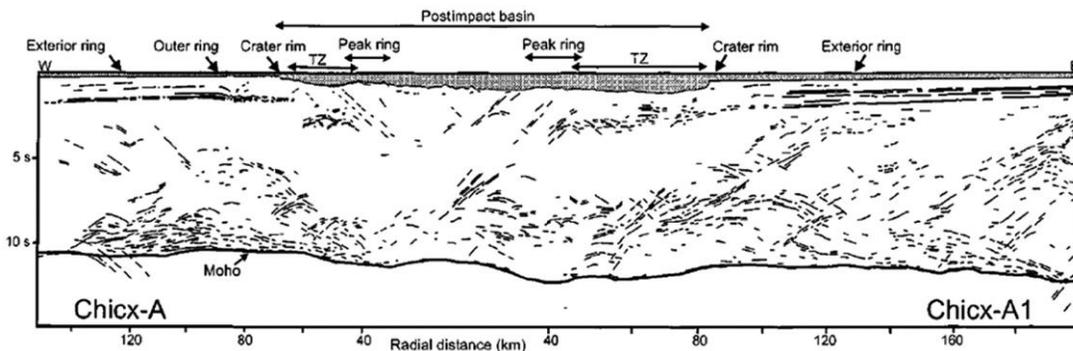
La interpretación de las anomalías gravimétricas y magnéticas que inicialmente llamaron la atención sobre el cráter se basó en modelos 2-D. Como ya se mencionó, los estudios nos dieron los modelos estructurales con geometrías contrastantes y estimaciones del tamaño del cráter, los modelos predijeron diferentes geometrías y morfología de la elevación central (Figura 6).



**Figura 6.-** Modelos esquemáticos del cráter Chicxulub mostrando la configuración propuesta para la elevación central y la estructura del cráter profundo. (Izquierdo) Modelo tomado del Hildebrand et al. (1998). (Derecha) Modelo tomado del Sharpton et al. (1993).

Se estudió la estructura del cráter usando muchos perfiles de sismica marina en la sección este-oeste EW orientadas a lo largo de la costa. Este estudio permitirá la imagen de la cuenca sedimentaria carbonatada y la secuencia de rocas impactadas formada de brechas y de rocas fundidas o derretidas, así como la disposición estructural de las fracturas del anillo que define el cráter. Dos estudios de sismica marina (1996 y 2005) se llevaron a cabo para investigar la morfología y la extensión del cráter. El estudio de 1996, se compone de 4 líneas streamer

multicanales orientadas radialmente al centro del cráter. Durante la campaña sísmica del 2005, se realizaron un total de 29 perfiles de sísmica de reflexión multicanal, que fueron adquiridos en distintas orientaciones. (Figura 7) muestra los diagramas de línea para los perfiles regionales el Chicx-A y el Chicx-A1. La deformación por el impacto y la excavación de la cavidad transitoria involucró a casi toda la corteza (Morgan, Warner et al. 1999). Los perfiles sísmicos a través del cráter, documentan fallas a profundidad y deformaciones del límite entre la corteza y el manto, con aproximadamente 35 kilómetros de reflectores sísmicos sólidos inclinados en la corteza intermedia y baja (Figura 7).



**Figura 7.-** Estructura profunda de Chicxulub de líneas compuestas dibujadas de perfiles de sísmica de reflexión no migradas Chicx-A y Chicx-A1 (tomadas de Morgan, Warner, 1999).

Los anillos del cráter y el anillo de picos, pueden estar asociados con el colapso de la cavidad transitoria y la deformación de la elevación central con los cabalgamientos y la zona de terraza predominante (Morgan, Warner et al. 1999). En el primer trabajo de interpretación (Morgan, Warner et al. 1997); (Morgan, Warner et al. 1999); (Snyder, Hobbs et al. 1999), se dieron cuenta de la presencia de fallas normales alrededor del centro del cráter de impacto y del levantamiento central. La estructura se compone de bloques inclinados separados por fallas normales y por rocas pre-impacto deformadas (Mesozoico y pre-Mesozoico).

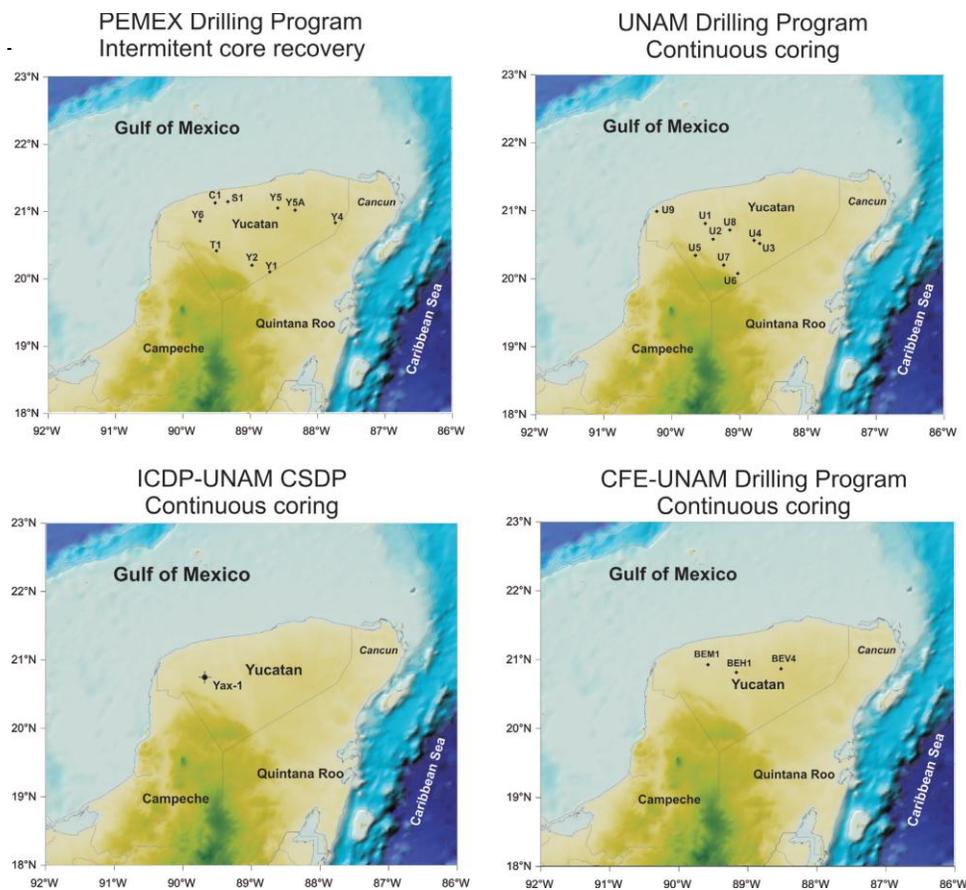
Recientemente, los estudios sísmicos marinos proporcionan imágenes de la cubierta de sedimentos carbonatados y la estructura del cráter de Chicxulub (Morgan, Warner et al. 1999); (Morgan, Lana et al. 2006); (Gulick, Barton et al. 2008). Los perfiles sísmicos delimitan la zona de terraza, proporcionando evidencia de una morfología de anillo de pico (Morgan, Warner et al. 1997); (Snyder, Hobbs et al. 1999). La tomografía de velocidades 3-D indica que se adelgaza la elevación central con la profundidad. Los análisis de los perfiles sísmicos se han ocupado también de la cartografía de los bloques de la zona de terraza y las fallas, así como de la caracterización de las brechas de impacto y de las unidades fundidas o derretidas (Vermeesch, Morgan et al. 2004); (Gulick, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008); (Salguero E., Urrutia-Fucugauchi J. et al. 2010); (Canales I. 2010). Sin embargo, la estructura de la elevación central y el anillo interior debajo de la cubierta sedimentaria del Paleógeno requiere de más análisis. Con base en la interpretación sísmica y otras evidencias de los pozos, se proponen 4 etapas de acerca de las fracturas o de las fallas:

- 1.- Ocurrió en el momento del impacto formando una cavidad transitoria.
- 2.- Se produjo cuando la elevación central y la capa de material expulsado se derrumbó o colapso, durante esta etapa se formó la estructura de anillo de pico.
- 3.- Se desarrolló la zona de terrazas o bloques inclinados.
- 4.- Debido a la compactación diferencial, se produjeron fallas menores y el hundimiento.

Este antecedente también nos describe algo sobre los Programas de Perforación que se han llevado a cabo en el lugar del cráter de impacto de Chicxulub.

### Los Programas de Perforación

Las perforaciones han proporcionado información sobre la estratigrafía del subsuelo y la estructura, así como del material para los estudios de las propiedades físicas en laboratorio, características de impacto, litologías generadas por el impacto, así como características de los meteoritos o bólidos y de componentes del basamento profundo.



**Figura 8.-** Ubicación de las perforaciones en el norte de la península de Yucatán. **a).**- Programa de Perforación de PEMEX. **b).**- Programa de Perforación de la UNAM. **c).**- Programa del Proyecto de Perforación Científica de Chicxulub (CSDP). **d).**- Programa de Perforación de UNAM-CFE.

Como parte de los estudios de exploración petrolera en la península, PEMEX desarrolló un programa de perforación en 1952 con la perforación del pozo Chicxulub-1 y que comprende eventualmente 9 pozos en la zona. El programa de perforación de PEMEX investigó la estratigrafía de las secuencias Mesozoica y Cenozoica, documentando la presencia de texturas de rocas ígneas en el área de las anomalías gravimétricas y magnetométricas concéntricas. El análisis estratigráfico y paleontológico permite la reconstrucción de la secuencia sedimentaria del subsuelo, así como de una explicación de los datos geofísicos en términos de un centro ígneo enterrado del Cretácico Superior de edad probable (López Ramos 1975). Las muestras de núcleos remanentes se almacenan en el Archivo Central de PEMEX.

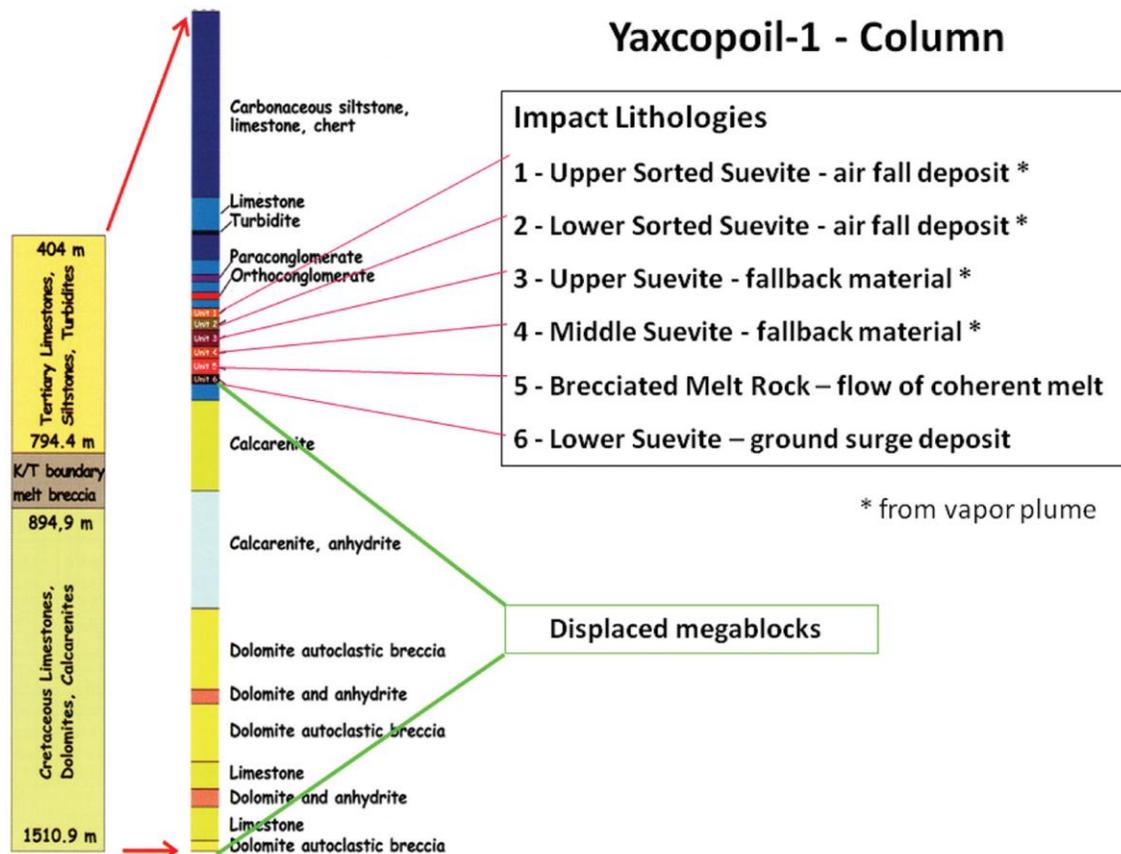
Perforaciones de pozos como el Chicxulub-1 (de 1581 metros de profundidad total), el Sacapuc-1 (de 1530 metros de profundidad total) y el Yucatán-6 (de 1645 metros de profundidad total) perforados en una unidad de roca de textura ígnea, que corresponden a la fundición o derretimiento, así como de la secuencia de brechas en las profundidades alrededor de 1.0 a 1.1 kilómetros. La perforación terminó en la unidad de roca fundida o derretida, que presenta un espesor mínimo de unos 250 metros. La sección de brechas es de 250 a 400 metros de espesor en estas perforaciones. La sección de brechas se redujo también en pozos fuera de la cuenca incrementando la distancia en el pozo de perforación del centro del cráter Ticul-1 (de 3175 metros de profundidad total), el Yucatán-2 (de 3488 metros de profundidad total), el Yucatán-5A (de 3003 metros de profundidad total), el Yucatán-1 (de 3226 metros de profundidad total) y el Yucatán-4 (de 2425 metros de profundidad total). La secuencia de brechas en los pozos perforados fuera de la cuenca, presenta un espesor considerable superior de 400 a 600 metros. Las secciones del Cretácico formadas por secuencias de calizas, margas y dolomitas, incluyen espesores de secciones de evaporitas y anhidritas, muestran un espesor variable de hasta 2.0 a 2.5 kilómetros en los pozos profundos. El basamento cristalino del Paleozoico se alcanzó con los pozos Yucatan-1 y el Yucatan-4.

El Programa de Perforación de la UNAM incorporó la extracción de núcleos continuos en 8 pozos distribuidos y fuera del borde del cráter, con 3 perforaciones cortando la brecha de los carbonatos de impacto (Connors, Hildebrand et al. 1996); (Rebolledo-Vieyra, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010). Las muestras de pozos de los carbonatos paleógenos y de las brechas de impacto con el contacto de la brecha y el carbonato de impacto tendidas a profundidades, varían entre los 222 metros y los 332 metros.

Las brechas de impacto se caracterizan por el carbonato, las rocas fundidas y los clastos del basamento cristalino y que están apoyados en una matriz rica en carbonato y en rocas fundidas. Las brechas superiores son ricas en clastos carbonatados y las brechas inferiores son ricas en clastos fundidos o derretidos y de basamento. Las brechas superiores tienen una alta susceptibilidad magnética, de velocidades sísmicas bajas, de una densidad baja, con una alta porosidad y permeabilidad. Las brechas inferiores en contraste, muestran sensibilidad

baja, velocidades sísmicas altas y variables, así como de baja porosidad y permeabilidad (Connors, Hildebrand et al. 1996).

El pozo Yaxcopoli-1, perforado como parte del proyecto internacional CSDP, investigó la estratigrafía y la estructura del cráter en el sector sur de la zona de la terraza (Urrutia-Fucugauchi et al., 2004a). El pozo Yaxcopoli-1 está localizado aproximadamente a unos 62 kilómetros desde el centro del cráter. Extracción de muestras de núcleos continuos de 404 metros hasta los 1511 metros, de sedimentos paleógenos aproximadamente 400 metros, de rocas impactadas aproximadamente 100 metros y de carbonatos del Cretácico mayor a los 1000 metros. El estudio se llevó a cabo en dos etapas, la primera desde la superficie hasta los 404 metros antes de empezar con el programa de extracción de muestras y después hasta los 1511 metros. En los datos obtenidos se incluyó la desviación del pozo y el azimut, la susceptibilidad magnética, los elementos radiactivos, los de resistividad eléctrica, el registro de velocidad acústica y las imágenes de la pared del pozo. La secuencia de roca impactada de espesor de 100 metros, está formada por 6 unidades distintas, que registran las condiciones variables de posicionamiento y de alteración hidrotermal posterior al impacto (Figura 9).



**Figura 9.-** Esquema de la columna del pozo Yaxcopoli-1, que muestra las divisiones litológicas principales. Las secuencias de roca impactada es aproximadamente de 100 metros de espesor y está formada por 6 diferentes unidades de brechas (Urrutia-Fucugauchi, Morgan et al. 2004); (Zürcher, Kring et al. 2004).

En la parte superior por debajo de los 895 metros de diques de brechas polimícticas están presentes. Capas de anhidritas, con espesor variable de unos pocos centímetros mayores a los 15 metros, están incluidas en los megabloques. Imágenes de núcleos de secciones representativas en los carbonatos paleógenos de la secuencia de rocas impactadas y de los carbonatos del Cretácico son ilustrados en la (Figura 10).



**Figura 10.-** La imagen de la caja de núcleos del pozo Yaxcopoli-1, representa las secciones en los carbonatos Paleógenos, la secuencia de rocas impactadas y los carbonatos del Cretácico.

En general las eyecciones del Chicxulub pueden extenderse de forma continua en la región de la península hasta la Isla de Albión y otros sitios en Belice, así como en las áreas de Chetumal. El depósito de eyección alrededor del cráter se ha recuperado en 3 pozos del programa de perforación de la UNAM. Afloramientos del material expulsado encontrado a lo largo del Río Hondo de Belice y Quintana Roo se han interpretado como la gravedad o flujos secundarios. Los afloramientos se encuentran a unos 360 kilómetros de distancia del centro del cráter, los cuales se agrupan en la Formación Albión. (Pope K., Ocampo A.C. et al. 2005), interpretaron la arcilla y la dolomita esférica como cristal alterado de impacto y como lapilli de acreación o aumento de aporte, respectivamente. La diamíctita contiene grandes bloques de acreación o aumento de aporte, adoquines pulidos estriados, vidrio alterado y ocasionalmente cuarzo golpeado. El depósito de material expulsado se coloca en la parte superior de las capas de agua poco profundas de la plataforma carbonatada del Cretácico Superior de la Formación Barton Creek.

Los estudios sugieren que el oleaje del mar en el cráter, resultó en la erosión de los depósitos de las brechas, posiblemente también afectan la morfología del anillo. Si el anillo estaba por encima del nivel del mar, pudo haber sido sometido a colapsos de erosión y de pendiente. Las condiciones después de la formación del cráter y del material expulsado, así como del

restablecimiento de la sedimentación de carbonatos han sido pobremente restringidas. La ocurrencia de procesos erosivos, se indican por la presencia de unidades delgadas del basamento observadas en los pozos.

La secuencia del material expulsado ha sido documentada en las zonas cercanas al Golfo de México, en afloramientos como (Guayal, Tabasco y Bochil, Chiapas) y en muestras de los pozos de exploración de PEMEX en el campo petrolero de Cantarell. (Grajales-Nishimura, Cedillo-Pardo et al. 2000), con base en estudios detallados de bioestratigrafía, sedimentológicos y diagenéticos de afloramientos, así como de muestras de pozo, donde se encontraron que la secuencia de los carbonatos clásticos cubren la caliza del Maastrichtiano hemipelágico medio tardío y las margas por debajo del Daniano temprano y las calizas arcillosas. La plataforma exterior, el medio ambiente de depósito en aguas profundas se interpreta para la secuencia en los pozos de Cantarell.

Los depósitos de material expulsado o de eyecciones continuas de grandes cráteres de impacto son relativamente raros. La capa del material expulsado en Chicxulub fue cubierto seguido del depósito de la capa basal esférica.

En la parte de los estudios de Petrografía y Geoquímica en el cráter de Chicxulub, describen las tareas iniciales para la evaluación de un origen de impacto relacionada con la estructura, así como de los indicadores mineralógicos de choque, las brechas de impacto y de sus secuencias.

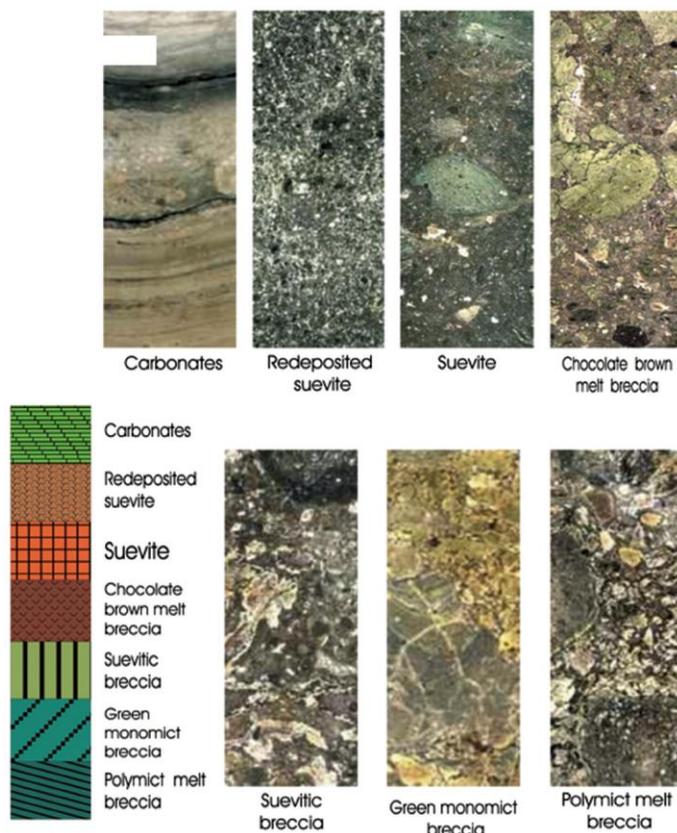
#### **Estudios de Petrografía y Geoquímica.**

Una de las tareas iniciales para la investigación fue la evaluación de un origen de impacto para la estructura. Esto involucra la identificación de los indicadores mineralógicos de metamorfismo de choque y la ocurrencia de brechas de impacto, así como de la formación derretida de una secuencia de impacto.

(Sharpton, Brent D. G. et al. 1992), analizaron granos de cuarzo y feldespato, que mostró uno o más conjuntos de características de deformación plana con diferentes orientaciones cristalográficas, características de la deformación de láminas de choque inducido. Los análisis de las muestras de la brecha, indican mezclas de materiales afectados por diferentes presiones de choques, lo que sugiere diferentes distancias relativas de la zonificación de impacto. También informaron de observaciones sobre el choque. Las muestras de los pozos como el Chicxulub-1 con el núcleo N10 y el Yucatan-6 con el núcleo N19, fueron analizados para contenido de Iridio. La abundancia en Iridio fue relativamente alta con contenidos variables, sugiriendo una distribución heterogénea dentro de la masa fundida, la cual podría estar relacionada con la mezcla no uniforme de material del bólido, fraccionándose durante el enfriamiento prolongado de la fusión y la cristalización, así como de la posterior alteración hidrotermal del impacto. Estos procesos son evidencia también de la datación radiométrica y de estudios magnéticos mineralógicos.

Las brechas de impacto y las brechas fundidas, se han seguido investigando en las muestras recuperadas en los programas de perforación de la UNAM y del CSDP. Las brechas de impacto y las brechas fundidas, se han caracterizado con base en el análisis geoquímico de elementos mayores, análisis y microscopía de electrón, así como de la medición de propiedades físicas. Los estudios también han incluido el análisis de los elementos del grupo del platino y el estudio de los isótopos, dirigidos a investigar procesos de superposición, alteración hidrotermal y de la naturaleza del bólido (ZüRcher, Kring et al. 2004); (Gelinas, Kring et al. 2004); (Urrutia-Fucugauchi, Morgan et al. 2004); (Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera et al. 2010).

La secuencia de impactita en el pozo Yaxcopoli-1, fue del núcleo de unos 795 hasta unos 895 metros (Figura 9). La sección está formada por 6 unidades distintas (Urrutia-Fucugauchi, Morgan et al. 2004); (Gelinas, Kring et al. 2004); (ZüRcher, Kring et al. 2004), que han sido nombrados, de arriba hacia abajo, como: (1) USS Suevitic Ordenada Superior (794-808 metros), (2) LSS Suevitic Ordenada Inferior (808-823 metros), (3) US Suevitic Superior (823-846 metros), (4) MS Suevitic Media (846-861 metros), (5) BMR Brecha de Impacto Roca Derretida (861-885 metros) y (6) LS Suevitic Inferior (885-895 metros). Imágenes de núcleos obtenidas con el Sistema de Escaneo de Núcleos CSDP de las secciones de las brechas, ilustra las diferentes texturas y la composición, (Figura 11).



**Figura 11.-** Secuencia de brechas de impacto en el pozo Yaxcopoli-1. Imágenes de núcleos obtenidas con el Sistema de Escaneo de Núcleos del CSDP en las secciones de las brechas, lo que ilustra las diferentes texturas y su composición.

Mediciones Paleomagnéticas han sido completadas con las muestras de corte y con perforaciones de las unidades de brechas. Los resultados indican que las brechas transportan magnetización remanente adquirida en el momento de su colocación, pero se vieron afectados en distintos grados por la alteración hidrotermal post-impacto (Urrutia-Fucugauchi, Morgan et al. 2004). Los estudios del modo de colocación de las unidades de brechas han sido utilizados para la reconstrucción de la estructura debido al material expulsado y los procesos del colapso durante la formación del cráter (Stöffler, Artemieva et al. 2004); (Velasco-Villareal, Urrutia-Fucugauchi et al. 2011).

En el capítulo de la Estratigrafía y la edad del impacto del cráter de Chicxulub, describen las tareas acerca del análisis estratigráfico de los pozos exploratorios, así como de la edad de la unidad litológica y su textura de la roca ígnea en el lugar.

### **Estratigrafía y la Edad del Impacto**

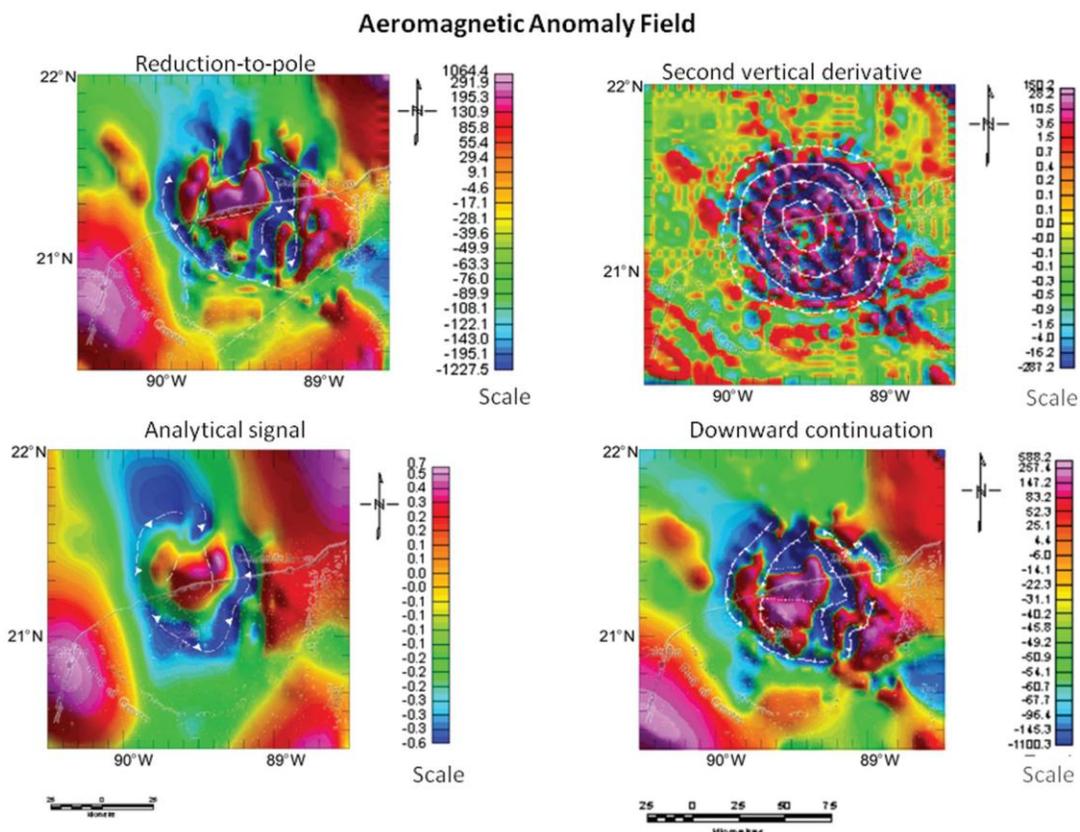
El análisis estratigráfico de los pozos exploratorios en el noroeste NW de la península de Yucatán reportan la edad de la textura de la unidad de roca ígnea, lo que corresponde a las brechas y las rocas derretidas, encontradas en los pozos Chicxulub-1, Sacapuc-1 y Yucatan-6, como el Cretácico Tardío. La interpretación le asigna una edad del Cretácico Tardío para los 60 hasta los 170 metros de rocas calizas y margas en la parte superior de las impactitas, que fue apoyada por la correlación de los registros de resistividad entre los pozos Yucatan-6 y Yucatan-1. (Hildebrand, Penfield et al. 1991) en su informe, se volvió a analizar la estratigrafía del pozo y propuso una edad que coincide con el límite (K-Pg). La correlación de la edad límite fue cuestionada, con base en los análisis estratigráficos y por la correlación de los registros (Meyerhoff A.A., Lyons J.B. et al. 1994); (Ward, Keller et al. 1995).

(Sharpton, Brent D. G. et al. 1992), reportó una edad aproximada de  $65.2 \pm 0.4$  millones de años para la fusión en Chicxulub, confirmando la asignación del límite de la edad (K-Pg). (Swisher III C.C., Grajales-Nishimura J.M. et al. 1992), reportó una edad de  $64.98 \pm 0.05$  millones de años y también mencionó las edades para la capa de (K-Pg) en la sección sedimentaria El Mimbral de  $65.07 \pm 0.10$  millones de años. Estas edades se correlacionan bien con los reportados para las tectitas Haitianas de las edades de  $64.05 \pm 0.1$  millones de años (Izett G.A. 1990), más el apoyo de la correlación del K-Pg del límite de la capa de material expulsado. Han propuesto una edad para estos límites de alrededor de 65.5 millones de años aproximadamente.

Las zonas de polaridad magnética registraron un cambio en la polaridad aproximadamente de los 794.03 hasta los 794.07 metros de profundidad. (Arz, Alegret et al. 2004), informó que los datos bioestratigráficos para la sección de los carbonatos e identificó los límites del K-Pg en las profundidades de 794.11 metros aproximadamente, con el Chron de polaridad inversa. Los carbonatos por encima de las brechas de impacto y por debajo el límite del K-Pg, muestra estructuras cruzadas y capas intercaladas verdosas de arena fina de las brechas retrabajadas. Por encima del límite K-Pg, la secuencia está compuesta por calizas dolomíticas laminadas.

## Discusión

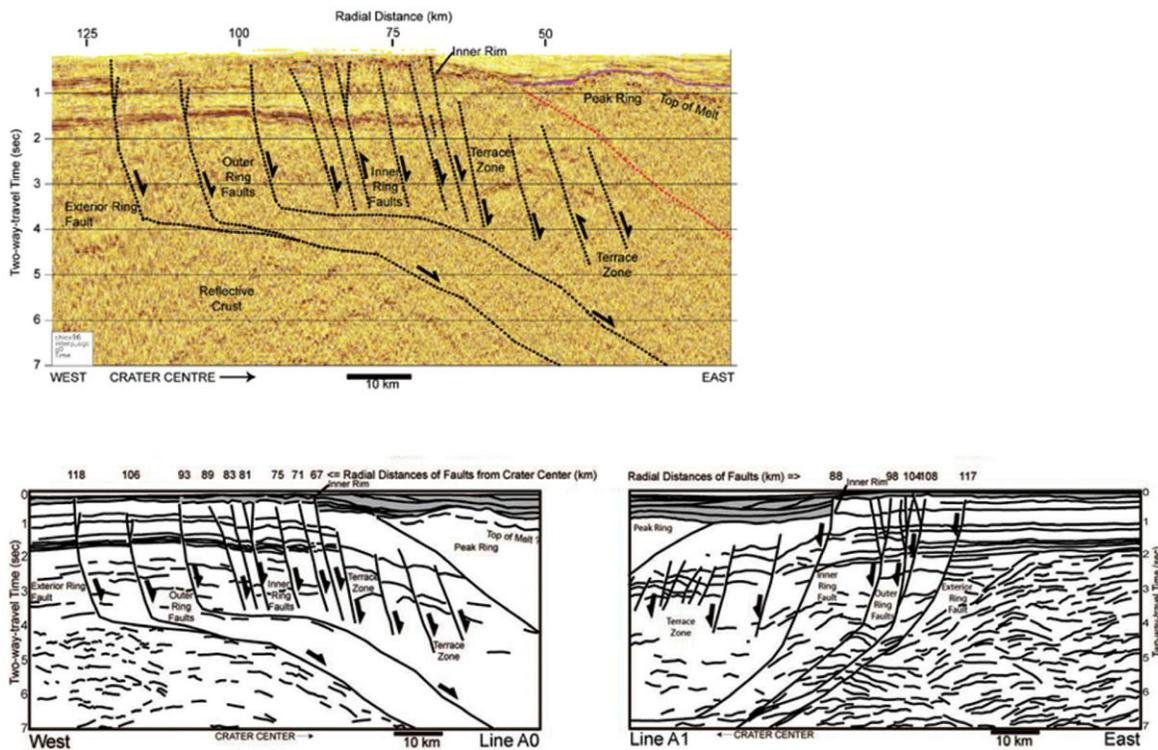
El cráter se caracteriza por patrones de gravedad concéntrica semi-circular y anomalías magnéticas asociadas con el sepultamiento de la cuenca y los altos contrastes en las propiedades físicas, entre los carbonatos de la plataforma y las litologías generadas por el impacto, así como del levantamiento central. Las anomalías gravitatorias se caracterizan por un bajo regional correspondiente a la gran cuenca dentro de la plataforma marcada por anillos concéntricos en relación con la estructura de la cuenca y un centro de alto regional. La alta gravedad central probablemente surge de la elevación intermedia de las densidades altas y de las rocas bajas de la corteza, formando el levantamiento central. La anomalía magnética muestra una zona central que corresponde aproximadamente a las anomalías de la gravedad central con anomalías dipolares polarizadas inversamente de amplitud alta, que están rodeadas por anomalías de amplitud baja de frecuencia alta que se extienden sobre un área grande de aproximadamente 200 kilómetros de diámetro. El procesamiento de los datos y el modelado de las anomalías aeromagnéticas con la reducción al polo, la señal analítica de la primera y la segunda derivada, así como del análisis ascendente y descendente de las continuaciones que permiten la caracterización de la ubicación y las profundidades de las fuentes, revelan las distribuciones simétricas y asimétricas en la profundidad (Figura 12).



**Figura 12.-** Imagen de la anomalía magnética sobre el cráter de Chicxulub en la plataforma de Yucatán (tomado del Rebolledo-Vieyra et al., 2010). **(a)** Reducción al polo del campo de anomalía magnética. La inclinación local del campo magnético es de  $45^\circ$  y la declinación es de  $5^\circ$ . **(b)** La segunda derivada del campo de anomalías aeromagnéticas. **(c)** La señal analítica del campo de anomalías aeromagnéticas.

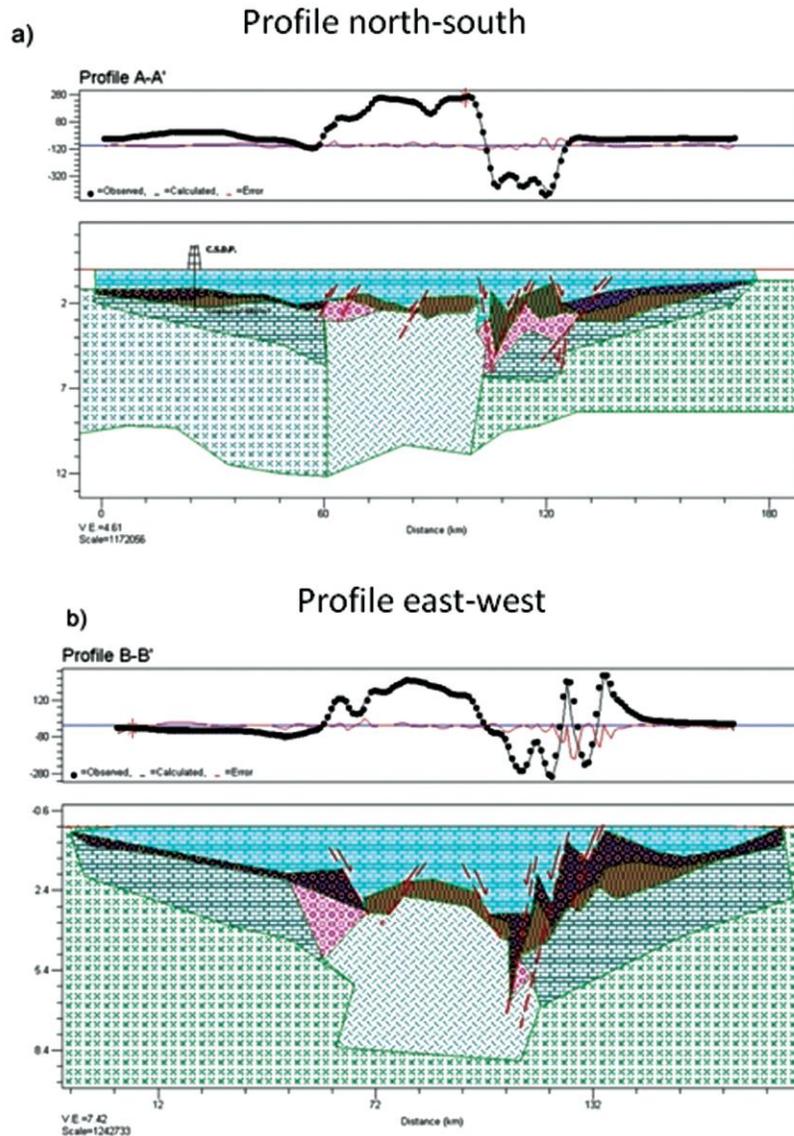
Las anomalías del campo potencial permiten la caracterización de la estructura del cráter y los elementos principales del cráter como la cuenca profunda, el anillo de pico central, el levantamiento del basamento, el borde de la cuenca, las fracturas del anillo, las brechas de impacto, las rocas fundidas, el relleno de los carbonatos del Paleógeno y las secuencias de carbonatos del Mesozoico (Rebolledo-Vieyra, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010); (Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010). Los modelos basados en datos del campo potencial, sin embargo no son únicos y los modelos distintos se ajustan a los datos observados y a las soluciones que requieren restricciones adicionales. Esta y otras consideraciones sobre los datos de la anomalía y los modelos, han dado lugar a modelos contrastantes que se proponen para la estructura del cráter, con una amplia gama de tamaños del cráter, la geometría, las fuentes de las anomalías y la morfología. Los perfiles de reflexión sísmica marina han ayudado a limitar la morfología del cráter, lo que demuestra la naturaleza del cráter de multi-anillo de pico y limitar la cavidad de excavación transitoria a unos 100 kilómetros y el diámetro del cráter a unos 195 a 200 kilómetros (Morgan, Warner et al. 1997); (Gulick, Barton et al. 2008).

Las asimetrías en el patrón de anomalías del campo potencial, particularmente en los sectores de la costa, han sido utilizadas para deducir el ángulo de impacto y su trayectoria. Las anomalías gravimétricas han sido interpretadas en términos de un impacto oblicuo superficial, con trayectorias SW-NE o SE-NW (Hildebrand, Pilkington et al. 1998). El ángulo de impacto o trayectoria son parámetros críticos estimando la energía liberada, la distribución del material expulsado y las perturbaciones ambientales (Pierazzo, Melosh et al. 1999). Un impacto oblicuo dirigido al noroeste NW ha sido relacionado con efectos ambientales y la distribución del material expulsado, así como el cuarzo impactado en el interior de las secciones de Norteamérica (Claeys, Kiessling et al. 2002). El análisis de los perfiles de la sísmica de reflexión marina documentan las fallas extensionales del anillo, la zona de terraza y el anillo de pico, con la reducción de la caída y el empuje hacia arriba de los bloques, así como de la escala en las asimetrías (Gulick, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008); (Collins, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008). Los perfiles documentan variaciones importantes en las fallas y en la estructura del cráter (Figura 13).



**Figura 13.-** El análisis estructural del cráter de Chicxulub, muestra la ubicación de las fallas en los dibujos interpretados para las líneas de Chicx-A y Chicx-A1 (tomados del Gulick et al., 2008). Las secciones ilustran la configuración asimétrica en el cráter. La figura muestra el perfil sísmico para la línea Chicx-A, con la interpretación estructural traslapada.

El anillo de pico se encuentra a unos 400 metros menos profundo en el sector occidental que en el sector oriental, con el reflector de profundidad principal está también a 1 kilómetro más hacia el oeste W. La zona de terraza es más profunda en el lado oeste W, con bloques caídos a una profundidad de 2 kilómetros en el sector noroccidental. Las asimetrías estructurales en la elevación central, el anillo de picos, las rocas fundidas, la secuencia de brechas, los sedimentos del Cretácico y las fallas, están documentadas en los modelos del campo potencial. En particular, la estructura de la corteza y la profundidad del agua varían a lo largo de la plataforma del Cretácico, haciéndose más profundas en el sector noreste NE de la base de la capa de la secuencia Mesozoica de 3 a 3.5 kilómetros de profundidad y la profundidad del agua a 1.5 kilómetros más profunda. Los modelos magnéticos en (Rebolledo-Vieyra, Urrutia-Fucugauchi et al. 2010), muestran una estructura asimétrica en los perfiles radiales (Figura 14), que apoya inferencias a partir de los modelos sísmicos.



**Figura 14.-** Los modelos magnéticos del cráter Chicxulub (tomado del Rebolledo-Vieyra et al., 2010). **(a)** Modelo del perfil AA' norte-sur. **(b)** Modelo del perfil este-oeste BB'. Observe la estructura asimétrica del cráter documentada en los modelos con respecto a la elevación central y el patrón de fallas.

Los modelos de anomalía magnética muestran cambios marcados en el levantamiento central, lo que sugiere que la respuesta de la corteza inferior de la excavación del cráter transitorio fue asimétrica, que sugiere un proceso complejo que involucra heterogeneidades o no de la corteza terrestre y la dinámica de impacto. Otras limitaciones han sido proporcionadas por los modelos computacionales. Los modelos que se asumen para secciones de 3 kilómetros con sedimentos de carbonato y sin capa de agua, así como de secciones de 4 kilómetros con sedimentos de carbonato y 2 kilómetros de capa de agua, dio lugar a diferentes geometrías de la zona de terraza, lo que indica que las heterogeneidades objetivo pueden influir en la estructura del cráter. Los resultados del modelo son compatibles con las observaciones derivadas de los datos de sismica de reflexión.

Una cuestión importante sostenida en los estudios del cráter de Chicxulub ha sido la edad del impacto y la relación con la extinción en masa, así como de los eventos en la frontera del K-Pg. Siguiendo los estudios sobre los impactos múltiples y una edad del Chicxulub anterior al límite (K-Pg) han sido reportados. (Keller G., Adatte T. et al. 2004); (Keller, Abramovich et al. 2009), han argumentado que el impacto de Chicxulub ocurrió hace aproximadamente unos 300 mil años antes de la extinción de los microorganismos marinos. Esta interpretación ha sido cuestionada, con estudios basados en la bioestratigrafía de los foraminíferos y el análisis de las secciones del K-Pg, concluyendo que el impacto en Chicxulub ocurrió en los límites del periodo (K-Pg) (Arenillas, Arz et al. 2007); (Schulte, Alegret et al. 2010).

Un aspecto crítico en los estudios está relacionado con la integridad o certeza de las secciones y la presencia del hiato que se refiere a un periodo sin sedimentación. Los procesos de alta energía pueden haber actuado en el área del cráter, incluyendo la generación de tsunamis asociados con el resurgimiento y los procesos de erosión por lavado. Los flujos de masas y los depósitos de los tsunamis se registran en los sitios proximales al Mar Caribe y el Golfo de México (Bourgeois et al., 1998). Depósitos gruesos residuales de carbonato se producen en áreas cercanas al Golfo de México, resultando la deformación que afecta la plataforma carbonatada (Alvarez, Smith et al. 1992).

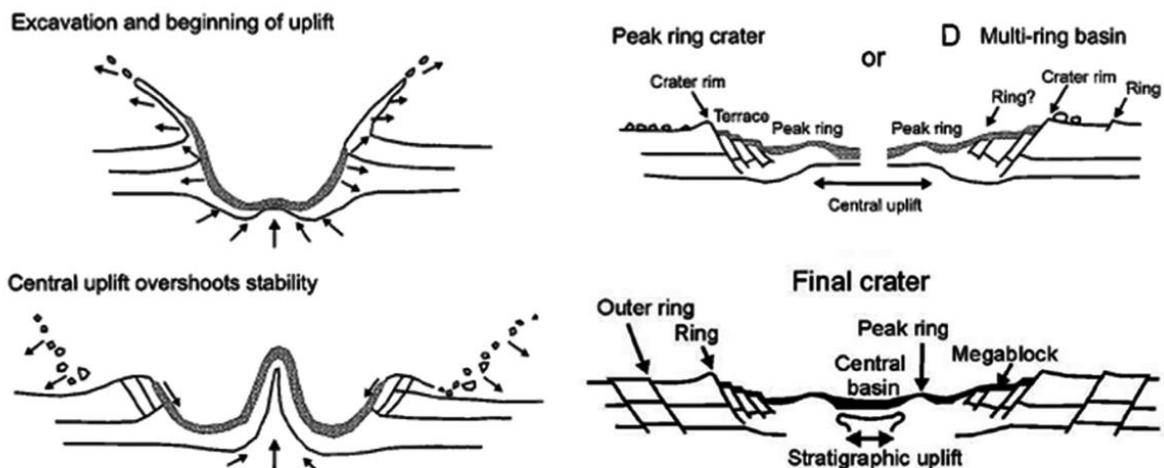
Los espesores y las características de la capa de arcilla mundial se ha analizado desde los primeros estudios por (Alvarez, Alvarez et al. 1980), que mostró que la anomalía de iridio y las características de la capa de arcilla, no tenían ninguna relación aparente para la posición geográfica del impacto. (Claeys, Kiessling et al. 2002), sugiere que la colocación o emplazamiento del cuarzo de choque y los efectos registrados en las secciones de Norteamérica se refieren a una trayectoria de impacto dirigido al noroeste NW. Un nuevo análisis realizado por (Morgan, Lana et al. 2006), concluyó que la distribución mundial de cuarzo de choque es compatible con un impacto individual de ángulo alto.

(Alvarez, Alvarez et al. 1980), propone que el impacto inyectó grandes cantidades de material fragmentado en la atmósfera, el polvo de grano muy fino permanece en la estratósfera durante varios años, causando perturbaciones ambientales y suprimiendo los procesos de fotosíntesis. El impacto sobre una sección de espesor de carbonatos con anhidritas y evaporitas, habría liberado grandes cantidades de gases climáticamente sensibles, incluidos los compuestos de azufre, vapor de agua y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera, contribuyendo a las consecuencias ambientales a nivel mundial. (Campos-Enriquez, Morales-Rodriguez et al. 1998), estimó con base en los datos del campo potencial, la cantidad de material liberado a la atmósfera. Los efectos potenciales sobre el medio ambiente marino y continental han sido evaluados. Los estudios han abordado el papel de polvo, oscuridad, baja fotosíntesis, gases de efecto invernadero, compuestos de azufre y la lluvia ácida, incendios forestales mundiales, la combustión de la biomasa, el pulso global de la radiación térmica en el suelo debido a la reentrada del material expulsado y la acidificación del océano.

Las características de las secciones del límite (K-Pg) en todo el mundo también son importantes en los estudios de las perturbaciones climáticas y ambientales, generados por el impacto y en los efectos en la biósfera. Los estudios han demostrado la distribución mundial de la capa de material expulsado, con secciones del límite del K-Pg en todas las áreas continentales y en las cuencas oceánicas.

Los depósitos marinos y continentales se caracterizan por una anomalía de iridio y minerales de choque. Los estudios realizados en el área marítima del Golfo de México y en el Caribe muestran que las secciones eran más complejas y más gruesas en comparación con los sitios más distales, con presencia de depósitos sedimentarios de alta energía y la capa del meteorito de impacto, también nos indica que los patrones de enriquecimiento de iridio varía con relación a la localización del sitio de impacto (Bourgeois, Hansen et al. 1988); (Alvarez, Smith et al. 1992); (Urrutia-Fucugauchi 1993).

En las últimas décadas, el interés en investigar el role de los impactos en la evolución de las superficies planetarias ha incrementado, como el resultado de las misiones de la exploración planetaria. En los estudios sobre la Luna y Marte han proporcionado datos multi-espectrales de alta resolución en una serie de cráteres de impacto que van desde la más simple forma de cavidad para grandes cuencas de anillo de picos y de varios anillos. Los estudios geofísicos, los programas de perforación y de extracción de núcleos en el cráter de Chicxulub, han contribuido a nuestra comprensión de la dinámica de los procesos de la formación de los cráteres de impacto y en particular sobre la formación de las grandes estructuras de multi-anillos (Figura 15).



**Figura 15.-** Modelo esquemático de los procesos de formación de cráteres en grandes estructuras de multi-anillo (Melosh, 1989; Gulick et al., 2008; Urrutia-Fucugauchi y Pérez-Cruz, 2009). La formación del cráter es un proceso rápido de energía alta, que requiere de altas temperaturas y presiones. Grandes volúmenes de material fragmentado fueron expulsados, formando un penacho y una cortina de material expulsado, con grandes picos.

Estos estudios están proporcionando información sobre las distintas fases de cráteres desde el contacto inicial, la excavación de la cavidad transitoria y la fragmentación de las rocas de destino, la elevación central, el penacho y el colapso de la cortina de material expulsado, rocas fundidas o derretidas, así como la formación de los anillos del cráter, la zona de terraza y la deformación post-impacto. Los estudios comienzan a abordar el role de las heterogeneidades de destino y el de las estructuras pre-existentes, así como el de las propiedades geológicas de los materiales a los regímenes de alta energía, que lleva a altas temperaturas y presiones.

En este último capítulo de Conclusiones, se describen lo más relevante que se ha tenido a partir de los estudios geofísicos, que han ayudado a comprender en su gran totalidad el origen del impacto que llevó a la estructura final del cráter de Chicxulub.

### **Conclusiones**

Las características geológicas y geomorfológicas de la plataforma carbonatada de Yucatán, formada por la depositación lenta de los sedimentos de carbonato, la tectónica del lugar estable ya que no tiene presencia de actividad volcánica, permite imágenes de alta resolución de la estructura subterránea del cráter con detalles sin precedentes. Entre las preguntas más importantes son los de la dinámica del evento de impacto, los efectos globales de la vida, los sistemas de apoyo y la comprensión de la física de los impactos en las superficies planetarias. En particular, el modelado de la deformación de la corteza y el comportamiento geológico de los materiales a altas temperaturas, así como de las presiones, siguen siendo retos importantes en las ciencias de la tierra (Melosh 1989); (Pierazzo, Melosh et al. 1999); (Urrutia-Fucugauchi, Perez-Cruz et al. 2009). El impacto y la formación del cráter se producen de forma instantánea, con la excavación de la corteza a una profundidad de aproximadamente 25 kilómetros en unas fracciones de segundo y la elevación de la corteza inferior, así como de la formación del cráter en los próximos 100 segundos. La liberación de la energía y la deformación de la corteza, generan ondas sísmicas que viajan por toda la tierra, dando lugar a fracturas y deformaciones intensas en el lugar de destino. En las últimas dos décadas se ha aprendido mucho acerca del cráter de Chicxulub y del límite del K-Pg, pero quizás lo más interesante son las preguntas restantes, que incluyen muchos aspectos fundamentales del impacto en Chicxulub y sus efectos.

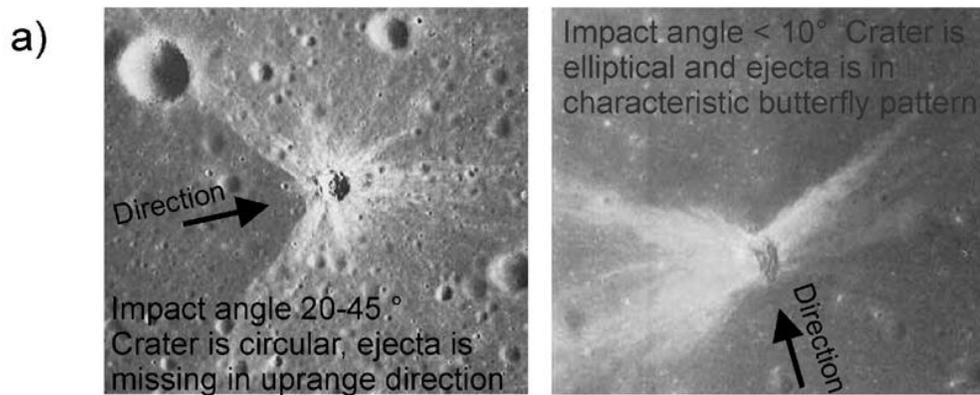
Otro artículo interesante que podemos comentar también para los antecedentes de este trabajo de investigación es el realizado por (Pierazzo, Melosh et al. 1999), se publicó el 18 de Noviembre de 1998, este artículo nos explica acerca de los métodos de modelación que se han realizado para la ayuda de la interpretación en la estimación del material expulsado y de la posible estructura inicial y final del cráter de impacto de Chicxulub. Mediante la modelación de hidrocódigos para eventos verticales, se llevaron a cabo simulaciones tridimensionales, para estudiar el ángulo de impacto.

## Impactos Oblicuos

Un artículo importante para este trabajo de investigación es el realizado por (Morgan, Lana et al. 2006), se publicó en Septiembre del 2006 en una edición del Science Direct, este artículo nos explica acerca de la causa de la extinción en masa de hace 65 millones de años, sobre el impacto del meteorito en Chicxulub, el tamaño del impacto, la química de las rocas de destino, las consecuencias ambientales, acerca del ángulo de impacto y el material expulsado, que se cita a continuación.

### Resumen.

La causa precisa y el momento de la extinción en masa hace 65 millones de años atrás en el periodo Cretácico-Paleógeno (K-Pg), el cual sigue siendo motivo de debate. Muchos defienden que la extinción fue causada por un impacto de un meteorito en Chicxulub, México, y un número de mecanismos potenciales de muerte se han propuesto para ello. Aunque ahora tenemos una buena limitación en el tamaño de este impacto y de la química de las rocas de destino, las estimaciones de las consecuencias ambientales se han visto obstaculizadas por la falta de conocimientos sobre la oblicuidad del impacto. Un impacto oblicuo es probable que haya sido mucho más catastrófico que un impacto sub-vertical, debido a mayores volúmenes de sustancias volátiles que han sido lanzadas a la atmósfera. El propósito principal de este estudio fue caracterizar el cuarzo de impacto o choque en material expulsado a distancia en el periodo (K-Pg), para investigar si la distribución de cuarzo lleva la firma de la dirección y del ángulo de impacto. Estos análisis muestran que el número total, el tamaño máximo y el promedio de todos los granos de cuarzo de impacto, disminuyen gradualmente con la paleodistancia de Chicxulub. No se encontró la abundancia alta en los sitios del Pacífico relacionados al Atlántico y Europa, como se ha informado anteriormente, y el tamaño de la distribución alrededor de Chicxulub es relativamente simétrico. En ambas distribuciones tales como el tamaño y el impacto, son consistentes con la capa del periodo (K-Pg) que han sido formados por un solo impacto en Chicxulub. Un sitio en el Atlántico sur contiene cuarzo que indica una anomalía de grado alto de impacto, que puede ser indicativo de un impacto oblicuo con una dirección amplia hacia el sureste SE  $\pm 45^\circ$ . La cobertura continua aparente de material proximal expulsado en este cuadrante del cráter, sin embargo, sugiere un ángulo de impacto relativamente alto de  $45^\circ$ . Se llegó a la conclusión de que las predicciones más extremas de las consecuencias ambientales de un ángulo de impacto bajo en Chicxulub, probablemente no son aplicables.



**Figura 16.- a)** Fotografías de cráteres lunares tomadas por el Apollo 13. Las flechas indican la dirección de la trayectoria del cuerpo impactante. Impactos muy oblicuos, producen cráteres elípticos y el material expulsado en forma de mariposa, los ángulos de impacto de hasta  $45^\circ$  producen cráteres simétricos con desaparición de material expulsado en la dirección del cuerpo impactante. Impactos mayores a los  $45^\circ$  muestran depósitos de material expulsado continuo alrededor del cráter. **b)** Mapa paleogeográfico del periodo (K-Pg), que muestra el tamaño máximo de los granos de cuarzo impactado (Claeys, Kiessling et al. 2002).

#### Distribución del nivel de impacto.

Descripciones petrográficas de los cráteres de impacto muestran que el metamorfismo de impacto es heterogéneamente más alta en una pequeña escala, y las muestras pequeñas de roca comúnmente contienen fases minerales como el cuarzo y el circón, que muestran una amplia gama de características metamórficas de impacto. Así, la gama de características de impacto en material expulsado en cualquiera del sitio del K-Pg es probable que se relacionen directamente con la naturaleza heterogénea del proceso de impacto y también reflejan la mezcla de vapor en el penacho antes de la dispersión en todo el mundo. Sin embargo, los primeros materiales expulsados incorporaron la expansión del penacho, en promedio, el impacto más alto, por lo tanto, podemos esperar que esto nos lleve a un cambio sistemático alrededor del mundo.

Resultados de los modelos numéricos indican que, en las primeras etapas del impacto, el material objetivo está sometido a las presiones de compresiones altas de impacto y es expulsado del cráter a grandes velocidades. Aunque la velocidad del material expulsado inicial es menor o igual a  $2 \text{ km/s}$ , este material de impacto alto entra en la parte exterior de la primera formación del penacho, y luego se aceleró rápidamente a altas velocidades durante la expansión del penacho. Por lo tanto, el material de impacto alto sale del cráter con mayor velocidad y termina más lejos del sitio del impacto. Esto es consistente con el incremento gradual observado en el impacto con distancia aparente. Para impactos oblicuos del modelo numérico predice que el impacto varía de acuerdo con la dirección, para cualquier distancia en particular del sitio de impacto, el mayor rango de material expulsado es el de mayor impacto.

**Dirección y ángulo de impacto.**

Como ya se mencionó un impacto oblicuo en Chicxulub, pudo haber producido una expulsión de material asimétrico de cuarzo de choque del sitio de impacto. El tamaño relativamente simétrico y la distribución del cuarzo de impacto alrededor del mundo, parece sugerir que el impacto no fue particularmente oblicuo. Sin embargo, los niveles altos del cuarzo de impacto en algunos sitios pueden ser indicadores de una dirección de alcance hacia el sureste de  $\pm 45^\circ$ . Para ángulos de impacto oblicuos de  $15^\circ$  a  $45^\circ$ , esperamos que el material proximal expulsado desapareció en la dirección del cuerpo que impacta, pero las secuencias estratigráficas del material proximal expulsado son observados en el sureste SE (Belice), el este E (Haití) y el sur S de Chicxulub (México). Estas observaciones combinadas sugieren que el impacto, si es oblicuo, probablemente fue de un ángulo mayor a  $45^\circ$ .

**Conclusiones**

Este es el primer estudio sistemático de cuarzo deformado o impactado en muchos sitios del límite del K-Pg. El tamaño y el número de granos de cuarzo impactado disminuyen con la distancia aparente del cráter de Chicxulub, y esta disminución es bastante simétrica. Esto contradice estudios previos que proponen que el cuarzo impactado era más abundante de lo esperado en el Pacífico y relativamente raro en Europa. Se llegó a la conclusión de que los análisis individuales dependen del protocolo y que en una comparación entre los estudios no relacionados, esto puede haber llevado a la interpretación incorrecta de que la distribución de cuarzo deformado o impactado fue asimétrica. El grado relativo observado del incremento de impactos con la distancia aparente, y esto es consistente con las predicciones de los modelos numéricos. Tanto el tamaño en la distribución y el grado medio del choque son, precisamente, como se espera, si la capa del K-Pg se creó por un solo, grande, y sub-vertical impacto en Chicxulub. Esto contradice las recientes publicaciones que se disputan el vínculo entre Chicxulub y el límite del periodo (K-Pg). La anomalía del nivel medio de impacto en un sitio en el sureste SE de Chicxulub, indica que el impacto podría haber sido oblicuo, y que este sitio era de alto rango. Sin embargo, los márgenes de error en esta dirección son actualmente muy grandes. La presencia de la secuencia estratigráfica de material proximal expulsado en los sitios del sur S, sureste SE y este E de Chicxulub indican qué, si el impacto fue oblicuo y hacia el sureste, el ángulo de impacto fue de más de  $45^\circ$ . Estudios previos han pronosticado que Chicxulub produjo un efecto dramático en el clima de la Tierra, porque este fue formado por un impacto oblicuo de bajo ángulo en sedimentos volátiles. Estos resultados sugieren que estas predicciones extremas sean poco probables.

Otro interesante artículo de antecedente es el de escala de impactos oblicuos de (Wünnemann, Elbeshausen et al. 2009).

### **Resumen**

Casi todos los impactos de meteoritos ocurren en un ángulo oblicuo de incidencia, sin embargo, el efecto del ángulo de impacto en el tamaño del cráter o del mecanismo de formación se entiende mal. Esto es, en gran parte, debido a la dificultad de inferir las propiedades del meteorito, como el tamaño, su velocidad y su trayectoria, a partir de observaciones de los cráteres naturales, el gasto y la complejidad de la simulación para los impactos oblicuos mediante modelos numéricos. Los experimentos de laboratorio para impactos oblicuos y para modelos numéricos anteriores, han demostrado que la porción de la energía cinética del proyectil que está involucrada en la excavación del cráter disminuye de manera significativa con el ángulo de impacto. Sin embargo, una cuantificación exhaustiva de escala planetaria de cráteres de impactos oblicuos no existe y el efecto del ángulo de impacto en el tamaño del cráter no es considerado por las leyes de escalamiento actual. Para eliminar esta carencia en la comprensión, se desarrolló el iSale-3D, que es un hidrocódigo múltiple de tres dimensiones, que es lo suficientemente eficaz para llevar a cabo un gran número de simulaciones de impactos oblicuos bien resueltos en un plazo razonable. Aquí se presentan los resultados de un estudio numérico integral que contiene más de 200 hidrocódigos de simulación en tres dimensiones que cubren una amplia gama de tamaños del proyectil, los ángulos de impacto y los coeficientes de fricción. Se demuestra que las leyes de escalamiento, en principio, describen eventos de impactos oblicuos a una escala planetaria en ángulos mayores de 30° medidos desde la horizontal. La masa desplazada de un cráter disminuye con el ángulo de impacto de una forma sinusoidal. Sin embargo, estos resultados indican que la hipótesis de que las escalas de tamaño del cráter con la componente vertical de la velocidad de impacto, no es válida para materiales con un coeficiente de fricción significativamente menor que 0.7 (arena). Se encontró que el aumento de los coeficientes de fricción resultan de cráteres más pequeños y de procesos de formación más controlados por el impulso de la energía del cuerpo que impacta.

### **Escala del tamaño del cráter.**

Las leyes de escala describen la relación funcional entre las propiedades del meteorito o cuerpo que impacta (densidad  $\delta$ , velocidad  $v$ , diámetro  $L$ ), las propiedades del objetivo (densidad  $\rho$ , fuerza  $Y$ , gravedad  $g$ ) y el tamaño del cráter. Medir el tamaño del cráter puede parecer trivial, pero en realidad se plantea un problema en los modelos numéricos de los cráteres de impacto a gran escala, donde la gravedad juega un papel dominante en la formación del cráter. ...”

**Formación y definición del tamaño del cráter.**

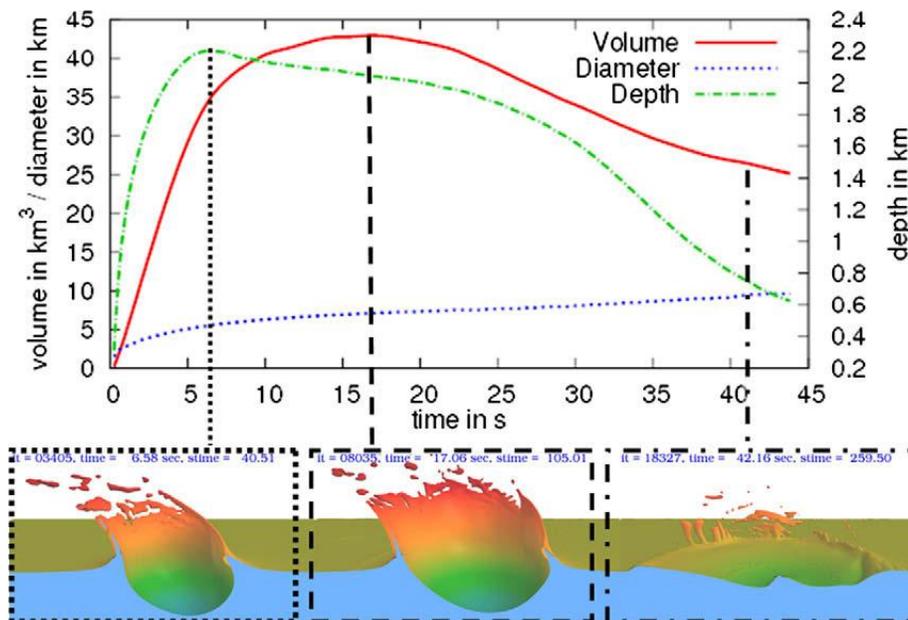
La formación del cráter se divide convencionalmente en tres etapas (Melosh 1989). En primer lugar, durante el contacto y la etapa de compresión, el meteorito impactador choca con el objetivo, lo que genera una onda de choque en la zona de contacto entre el impactador y el objetivo. En segundo lugar, durante la etapa de excavación, la onda expansiva se propaga a través del objetivo, la transferencia de energía y el impulso a la meta, así como del establecimiento de un flujo de excavación que se abre un profundo cráter en forma de cuenca. Eventualmente, el crecimiento del cráter se detiene cuando la energía cinética es insuficiente para desplazar el objetivo en contra de su propio peso (cráteres dominados por la gravedad) o en contra de la fuerza cohesiva del material objetivo (cráteres dominados por la fuerza). Por último, si el material objetivo es débil, o el peso del material desplazado es grande, la profundidad del cráter puede colapsar para formar un cráter final, por lo general, un mayor colapso aumenta el diámetro del cráter, pero disminuye el volumen y la profundidad del cráter. La cantidad y la extensión del colapso dependen sensiblemente de las propiedades de resistencia del material objetivo y el tamaño de la escala del impacto. Como consecuencia de ello, en los cráteres que han sufrido un colapso importante, el tamaño del cráter final no puede ser directamente relacionado con la energía cinética del impactador.

Un concepto muy popular en los cráteres de impacto es que el “cráter transitorio”, que representa la forma del cráter en el final de la etapa de excavación y el comienzo de la etapa del colapso, o modificación (Dence, Grieve et al. 1977); (Melosh 1989). El cráter transitorio es importante, porque su tamaño es considerado como la medida del cráter que mejor refleja la energía cinética o impulso del impactador, y la mayoría de las leyes de escala se refieren a las dimensiones del cráter transitorio (Holsapple 1993). Para los impactos de fuerza alta o de baja gravedad, el colapso del material objetivo pueden ser insignificantes y el cráter transitorio es muy similar al del cráter final. En tales casos, es trivial para medir las dimensiones del cráter transitorio. Este es el caso típico de los pequeños experimentos de laboratorio de impactos, excepto si el material objetivo tiene una fuerza baja o nula. Sin embargo, a medida que disminuye la fuerza del objetivo, o que incrementa la gravedad, el colapso se convierte en una importante etapa en la evolución del cráter y la morfología del cráter final, puede ser sustancialmente diferente de la del cráter transitorio. En este caso, medir el tamaño del cráter transitorio puede ser problemático.

En los llamados cráteres simples observados en las superficies planetarias (o cráteres generados por explosiones en la Tierra), la modificación se manifiesta como el colapso menor de los bordes y la agrupación de lentes de residuos en el cráter (Grieve 1977). En este caso, el cráter transitorio y la geometría del cráter final, están en forma de cuenca, pero el cráter final tiene una profundidad menor al diámetro. Sin embargo, para cráteres simples a menudo es posible estimar las dimensiones del cráter transitorio (Grieve 1989). En cráteres de tamaño grande (o su equivalente en mayor gravedad o de menor fuerza del objetivo) la modificación puede ser mucho más extrema, lo que llamamos cráteres complejos. El colapso de los cráteres complejos, implica rebotes en el suelo del cráter (y temporalmente sobrepaso de la

superficie de destino antes del impacto) y la caída de las paredes del cráter hacia abajo y hacia el centro del cráter. En este caso, el cráter final es muy diferente a la del cráter transitorio, que es muy difícil estimar el tamaño del cráter transitorio. Sin embargo, experimentos de laboratorio en arena seca (Gault, Wedekind et al. 1978) y las observaciones de los cráteres lunares (Pike 1974), reveló que la relación entre el diámetro del borde del cráter y el diámetro aparente, es aproximadamente el mismo para todas las escalas y es independiente de la gravedad.

Una complicación adicional en la definición del cráter transitorio surge en potencia baja o en la escala grande de alta gravedad del cráter porque la transición del flujo hacia el exterior modifica el flujo hacia dentro, no ocurre al mismo tiempo en todas las direcciones. Por ejemplo, en la mayoría de los casos la profundidad del cráter alcanza un máximo antes que el diámetro del cráter (Figura 17).



**Figura 17.-** Evolución de un cráter formado por el impacto de un proyectil de granito del tamaño de 1 kilómetro con velocidad de 6.5 km/s. Evolución gráfica del volumen, profundidad y diámetro del cráter. **(Izquierda)** Imagen que muestra la profundidad máxima del cráter. **(Centro)** Aproximación de volumen máximo. **(Derecha)** Forma del cráter en una etapa tardía.

Si la recuperación sustancial del piso del cráter se produce antes de la excavación hacia el exterior, ¿Cuál es el momento adecuado para medir las dimensiones del cráter transitorio? Este problema se agrava para impactos oblicuos, donde además, la excavación del cráter puede continuar en la dirección hacia el suelo, mientras que en el cruce o en direcciones hacia arriba comienza el colapso.

Los modelos numéricos de este estudio son impactos en una escala de tamaño, donde el crecimiento del cráter es en gran parte controlado por la gravedad y el cráter transitorio es modificado por la gravedad impulsada por el colapso del cráter. Por lo tanto, la definición de las dimensiones del cráter transitorio de los modelos requiere cuidado. En este análisis de la

formación del cráter en las escalas de diferentes tamaños y en objetivos con diferentes propiedades de los materiales (y por tanto, en diferentes grados de colapso) se encontró que al final de la excavación del cráter (y el comienzo de la modificación) coincide aproximadamente con el momento en que el (primero) alcanza el volumen máximo del cráter (Figura 17). En algunos casos, el objetivo de muy baja intensidad, incluso un mayor volumen del cráter se alcanza en tiempos largos de la formación del cráter.

Todas las leyes de escala se refieren a las medidas del cráter transitorio y se comparan con los parámetros de los modelos numéricos medidos en el momento del crecimiento del cráter, cuando el volumen del cráter alcanza su primer máximo. Las dimensiones del cráter transitorio se miden, o son relacionadas con la superficie pre-impacto. Se muestran algunas tablas que proporcionan información adicional respecto a las dimensiones del cráter en el momento en que el cráter alcanza su máxima profundidad. Para este estudio, sin embargo, se utilizaron criterios de volumen máximo.

$\pi_2$	L	CPPR	$\alpha$	f	At time of first local maximum of volume				At time of maximum depth			
					$\pi_V$	$\pi_D$	$\pi_H$	T	$\pi_V$	$\pi_D$	$\pi_H$	T
6.01e-4	1607.84	8	90	0.0	155.800	8.688	3.803	86.408	7.592	4.342	133.670	55.221
6.01e-4	1607.84	12	90	0.0	167.600	8.854	4.014	82.805	7.822	4.404	144.350	55.216
6.01e-4	1607.84	16	90	0.0	168.990	8.892	4.034	84.007	7.897	4.413	147.650	57.001
6.01e-4	1607.84	24	90	0.0	173.230	9.068	3.991	85.802	7.982	4.412	150.090	56.402
6.01e-4	1607.84	32	90	0.0	177.460	9.119	4.066	85.206	8.097	4.443	155.050	57.605
1.20e-4	320.53	8	90	0.0	463.570	12.817	5.324	226.020	11.207	5.971	399.780	144.010
1.20e-4	320.53	12	90	0.0	494.120	13.097	5.500	224.000	11.570	6.071	432.190	148.010
1.20e-4	320.53	16	90	0.0	495.540	13.289	5.301	240.000	11.621	6.092	438.040	152.000
1.20e-4	320.53	24	90	0.0	500.640	13.368	5.363	238.000	11.717	6.074	442.160	152.000
1.20e-4	320.53	32	90	0.0	513.700	13.493	5.414	240.000	11.797	6.125	451.150	152.000

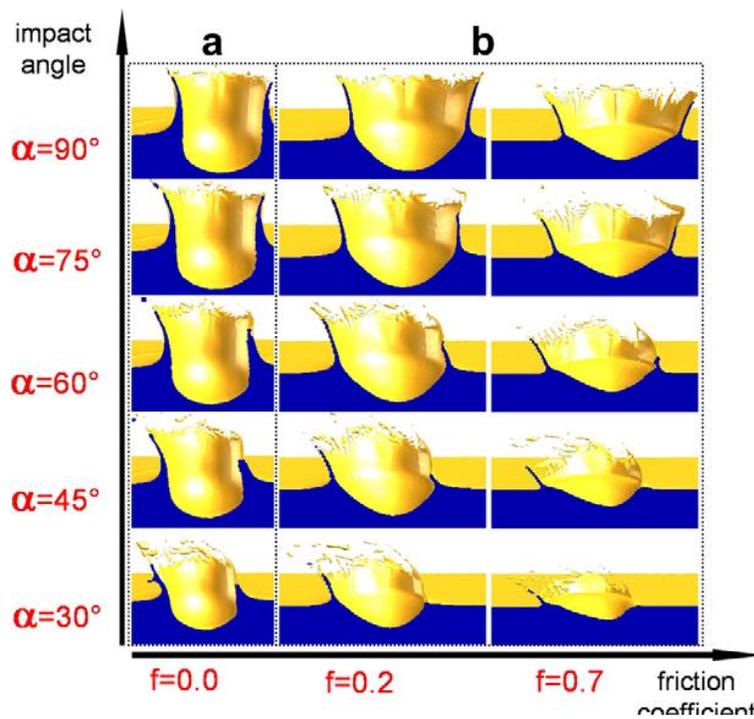
**Tabla 4.- Resultados de modelos en 3D: efectos de resolución (todos los cálculos son hidrodinámicos y verticales). El tamaño del cráter está en la lista para el momento del primer máximo del volumen local que el cráter alcanza y el tiempo en el que se alcanza la máxima profundidad del cráter. Los cálculos se realizan con 8 celdas por radio del proyectil (CPPR) y una velocidad de impacto de 6.5 km/s. El tiempo de formación está en la lista como un tiempo de escala de  $T = t U/L$ .**

## Resultados.

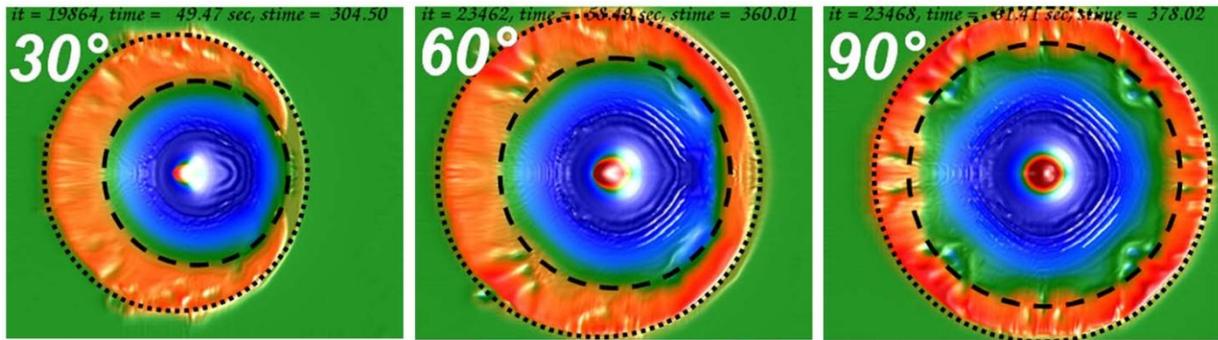
Se utilizaron los resultados de la serie de simulaciones de impactos y las mediciones de la profundidad, el diámetro y el volumen del cráter, tanto en el momento de volumen máximo del cráter y la profundidad máxima del cráter. Sin embargo, en este artículo se centran en un cráter transitorio, denominado como el volumen máximo del cráter. Se presentan los resultados de las simulaciones con un tamaño de proyectil fijo para los coeficientes de fricción adicional, para proporcionar una descripción más cuantitativa de la interacción entre los efectos del coeficiente de fricción y el ángulo de impacto. Finalmente, se presentan los resultados de los cálculos verticales en los que sistemáticamente variaron con el tamaño del proyectil y el coeficiente de fricción para investigar el efecto del coeficiente de fricción en la formación de los cráteres.

### El efecto del ángulo de impacto en objetivos hidrodinámicos.

La Figura 18a muestra las fotos del cráter transitorio después del impacto de un proyectil de 1 kilómetro de diámetro a una velocidad de  $6.5 \text{ km/s}$  en un objetivo hidrodinámico ( $f=0.0$ ) para diferentes ángulos de impacto. Esto ilustra como el ángulo de incidencia afecta el tamaño y la forma del cráter transitorio. Con la disminución del ángulo de impacto, tanto en el punto más profundo del cráter transitorio y el centro geométrico son más compensados hacia el suelo en relación con el primer punto de contacto. La Figura 19 muestra la morfología del cráter final en vista de planta de los cráteres formados en tres ángulos diferentes de impacto en un objetivo con un coeficiente de fricción de 0.2. La forma de la cortina de material expulsado indica claramente la dirección del impacto (en este caso de derecha a izquierda), sin embargo, el cráter por debajo de la superficie de destino antes del impacto tiene forma de cuenca y es simétrica incluso para un ángulo de impacto bajo como de  $30^\circ$ .



**Figura 18.-** Imágenes del cráter transitorio para un proyectil de 1 kilómetro de diámetro y una velocidad de  $6.5 \text{ km/s}$  para diferentes ángulos de incidencia y la resistencia del objetivo. Tanto el objetivo como el material del proyectil se componen de granito, pero es despreciada la cohesión para mostrar el efecto del coeficiente de fricción para los diferentes ángulos de impacto. El ángulo de impacto decrementa de arriba hacia abajo. Los resultados se muestran para un objetivo hidrodinámico en ( $f=0$ , columna de la izquierda), un blanco débil ( $f=0.2$ , columna central) y para un objetivo poco más fuerte ( $f=0.7$ , columna de la derecha).



**Figura 19.-** Última etapa de la formación del cráter causado por un proyectil de 1 kilómetro de diámetro a una velocidad de 6.5 km/s hacia un objetivo. Se muestran los cráteres de impacto de diferentes ángulos (coeficientes de fricción de  $f=0.2$ ).

### Conclusiones y perspectivas futuras.

El estudio del efecto del ángulo de impacto en la escala del cráter nos da 3 modelos numéricos tridimensionales. Los parámetros permiten realizar estudios en tercera dimensión para el procesamiento de formación de cráteres. Para este estudio se amplió y se combinaron diferentes componentes de los datos de pozo de la familia de los hidrocódigos (Amsden, Ruppel et al. 1980); (Ivanov, Deniem et al. 1997); (Ivanov 2005); (Wünnemann, Collins et al. 2006). Se utilizó para crear un nuevo código optimizado, iSALE-3D, que se utiliza para investigar la influencia del ángulo de impacto y el coeficiente de fricción del destino de impacto en la formación del cráter, así como de la eficiencia de la formación de cráteres. Las observaciones más importantes son de 200 experimentos numéricos que son los siguientes:

- De acuerdo con las poblaciones de cráteres observados en las superficies planetarias y en experimentos de laboratorio de impactos oblicuos en ángulos mayores de 30° a la superficie del objetivo, producen cráteres circulares.
- Tanto el ángulo de impacto y el coeficiente de fricción en el objetivo de impacto, se reducen significativamente en la eficiencia de la formación de los cráteres. Este efecto es independiente del tamaño de la escala de gravedad de un evento.
- El acoplamiento entre la energía del impactador o del momento, depende del coeficiente de fricción y pueden ser considerados por la determinación empírica del acoplamiento exponencial, mediante experimentos de impactos numéricos o verticales de laboratorio en diferentes materiales con diferentes coeficientes de fricción. Tenga en cuenta que otras propiedades deben ser consideradas, tales como la porosidad.
- Para los impactos oblicuos en los objetivos de impacto con un coeficiente de fricción de  $f=0.7$ , se encontró una eficiencia que disminuye sinusoidalmente en la formación del cráter.
- Estos resultados muestran que para el coeficiente de fricción, el aumento de la escala exponencial de la formación de cráteres hace que disminuya la eficiencia.

En general, se llegó a la conclusión de que los experimentos numéricos del concepto de fuente puntual y del grupo de escalas con la ampliación (Chapman y McKinnon, 1986) se aplica a escalas planetarias de impactos oblicuos ( $\alpha=30-90^\circ$ ) en los materiales naturales con propiedades similares a los de la arena, con un coeficiente de fricción de  $f=0.7$ , con poca o ninguna cohesión. Sin embargo, la simple ampliación de la teoría de la escala, probablemente no es válida para materiales con propiedades muy diferentes a la arena.

Además, las mejoras en programas como el iSale-3D, el refinamiento de la malla (AMR), el subcycling Lagrangiano o el nuevo enfoque de adaptación método ALE para mejorar la velocidad del cálculo y permitir de ese modo la alta resolución de las simulaciones de impactos a escala de laboratorio. Esto permitirá un código de validación más completo con los experimentos de laboratorio, así como del aporte de nuevos conocimientos sobre la dinámica de la formación del cráter.

Análisis de antecedentes previos, nos dan detalles sobre otros desarrollos teóricos relacionados con el tema como (Chavez-Aguirre, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008), como base de este proyecto de investigación, estos estudios nos dan un amplio panorama sobre una razonable explicación de la relación que tiene el material expulsado debido al impacto del bólido y de la secuencia carbonatada en el sector del cráter Chicxulub.

El cráter de Chicxulub desde entonces ha sido cubierto por carbonatos del Terciario post-impacto. La cubierta de sedimentos, la ausencia de una importante actividad volcánica y tectónica en la plataforma carbonatada han protegido el cráter de la erosión y de la deformación, por lo que el cráter Chicxulub, es el único cráter multi-anillo en el que se expulsó material y está bien conservado.

# **Capítulo III**

## **Métodos**

## MÉTODOS

### Métodos y teorías aplicables

Para la correcta aplicación de la teoría y los métodos geofísicos, es importante tener en cuenta conceptos fundamentales relacionados con la aplicación del método para este estudio. Esto formará la base de nuestros argumentos y en los cuales se apoyarán las ideas propuestas para este trabajo.

Los modelos geofísicos han tenido una gran importancia para la obtención de información acerca del origen, formación, progreso y evolución del cráter de impacto Chicxulub.

Para este estudio se aplicará la prospección gravimétrica, la cual ha ayudado a inferir la morfología y el tamaño del cráter, usaremos modelos gravimétricos anteriormente obtenidos del lugar y para nuestro estudio usaremos correcciones de Anomalía Gravimétrica de Bouguer Simple para los datos adquiridos en la zona sur del cráter de Chicxulub.

La prospección gravimétrica adquiere mediciones en la variación del campo gravitacional terrestre con instrumentos sensibles para la obtención de datos gravimétricos. La prospección gravimétrica usa el método de la fuente natural, la cual varía con la densidad de las rocas que se encuentran muy profundas ó cerca de la superficie, las cuales causan cambios instantáneos en el campo de gravedad principal de un sitio a otro.

El método gravimétrico intenta medir mínimas diferencias en el campo de fuerza que es relativamente enorme. En ambos casos los campos principales varían con la posición y en menor medida con el tiempo. Las anomalías gravimétricas son mucho más pequeñas y mucho más suaves que las anomalías magnéticas. Los instrumentos usados en la gravimetría deben ser considerablemente más sensibles que los instrumentos usados en la magnetometría.

Las correcciones a las lecturas observadas son mucho más complicadas en el trabajo de la prospección gravimétrica, de hecho son más complicadas que cualquier otro método geofísico. El mismo instrumento no puede ser empleado para medir los campos principales y las mínimas variaciones; esto no es aplicado para el trabajo con la prospección gravimétrica. Por otra parte, los instrumentos gravimétricos y el trabajo en campo, necesita más personal calificado, es más lento y es más caro.

La prospección gravimétrica es usada como una herramienta de reconocimiento en la exploración petrolera; aunque en exploración marina o aérea tiene costos altos, esto sigue siendo considerablemente más económico que los métodos sísmicos 3-D y de wide-azimuth.

### Tablas de Rocas Sedimentarias

El parámetro importante en la exploración de la gravedad (la fuente anómala) es una variación local de la densidad. La máxima variación de la densidad de diferentes rocas, entre rocas y minerales es de aproximadamente dos. Los resultados de laboratorio no necesariamente son para obtener la densidad real de la formación, ya que las muestras pueden ser degradadas y fragmentadas o deshidratadas.

Para las tablas de valores de densidad de rocas sedimentarias y sedimentos, debemos considerar algunos puntos, como el que las rocas sedimentarias tienen densidades más bajas que las rocas ígneas y metamórficas, que los sedimentos de la densidad promedio varían con la composición, siendo más bajo para un conglomerado y la arenisca, seguido de la lutita, piedra caliza y dolomita. Esta amplia variedad se debe a las variaciones en la porosidad, además de los fluidos contenidos en los poros, que afecta la densidad hasta en un 10%, por eso las mediciones de laboratorio deben realizarse con la muestra a condiciones de la formación de la que fue removida.

Esta densidad también es influenciada por la edad y la profundidad en la que se encuentra dicha muestra. Una roca enterrada, será compactada y consolidada en un grado que depende del tamaño y la duración de la carga. Por lo tanto, la densidad incrementa con la profundidad y el tiempo.

Cabe señalar que el contraste de densidad normal entre formaciones sedimentarias adyacentes en el campo es rara vez más de  $0.25 \text{ g/cm}^3$ .

La tabla 5 y 6, es una lista de densidades de rocas sedimentarias y sedimentos que vamos a utilizar para darle valores aproximados a nuestros modelos, así como dar el rango de densidades aproximadas para cada tipo. Es evidente que esté conectado con la historia geológica de la región.

Tipo de Roca	Intervalo ( $\text{g/cm}^3$ )	Promedio (humedad)	Intervalo ( $\text{g/cm}^3$ )	Promedio (seco)
Aluvión	1.96 – 2.0	1.98	1.5 – 1.6	1.54
Arcillas	1.63 – 2.6	2.21	1.3 – 2.4	1.70
Arenas	1.7 – 2.3	2.0	1.4 – 1.8	1.60
Arenas y Arcillas	1.7 – 2.5	2.1	---	---
Limo	1.8 – 2.2	1.93	1.2 – 1.8	1.43
Suelos	1.2 – 2.4	1.92	1.0 – 2.0	1.46
Areniscas	1.61 – 2.76	2.35	1.6 – 2.68	2.24
Lutitas	1.77 – 3.2	2.40	1.56 – 3.2	2.10
Calizas	1.93 – 2.90	2.55	1.74 – 2.76	2.11
Dolomitas	2.28 – 2.90	2.70	2.04 – 2.54	2.30

**Tabla 5. Densidad de Sedimentos y Rocas Sedimentarias.**

Tipos	Intervalo ( $\text{g/cm}^3$ )	Promedio
Agua de mar	1.01 – 1.05	---
Roca de sal	2.1 – 2.6	2.22

**Tabla 6. Densidad de Minerales no metálicos y de varios productos.**

## Perforación de Pozos

La información inicial sobre la litología y la estructura del subsuelo del cráter se deriva de estudios geofísicos y del programa de perforación de exploración petrolera llevada a cabo por la Compañía Mexicana de Petróleo (PEMEX) a partir de la década de 1950 en la zona del cráter de Chicxulub, los resultados del programa de exploración no mostraron indicios de yacimientos petroleros ni de gas en la zona.

Las perforaciones han proporcionado información somera de 1 a 3 kilómetros de profundidad aproximada sobre la estratigrafía del subsuelo y la estructura, así como del material para los estudios de las propiedades físicas en laboratorio, características de impacto, litologías generadas por el impacto, características de los meteoritos o bólidos y de componentes del basamento profundo, someros en comparación con los modelos gravimétricos construidos en este trabajo de investigación.

Es una herramienta útil para las prospecciones geofísicas, ya que relaciona los modelos directos e indirectos, o bien, lo cualitativo con lo cuantitativo, lo real con lo aproximado.

En el caso de la zona sur del cráter de Chicxulub, se cuenta con 9 pozos de perforación cercanos a nuestros perfiles de estudio. Estas perforaciones fueron realizadas por diferentes compañías petroleras. Los pozos más cercanos al área de nuestro estudio se encuentran orientados en la siguiente imagen (Figura 20) y descritas en la tabla (Tabla 7). Estos pozos se encuentran a profundidades no mayores a los 3 kilómetros de profundidad, los cuales para nuestro estudio son solo de información poco factible, ya que son estudios muy someros, esto nos deja aún incógnitas para la realización de un modelo de las capas profundas que provocan la anomalía en estudio.

Sin embargo, los estudios de pozos, nos pueden ayudar a una posible interpretación de la dirección del meteorito de impacto en la plataforma carbonatada de Yucatán.

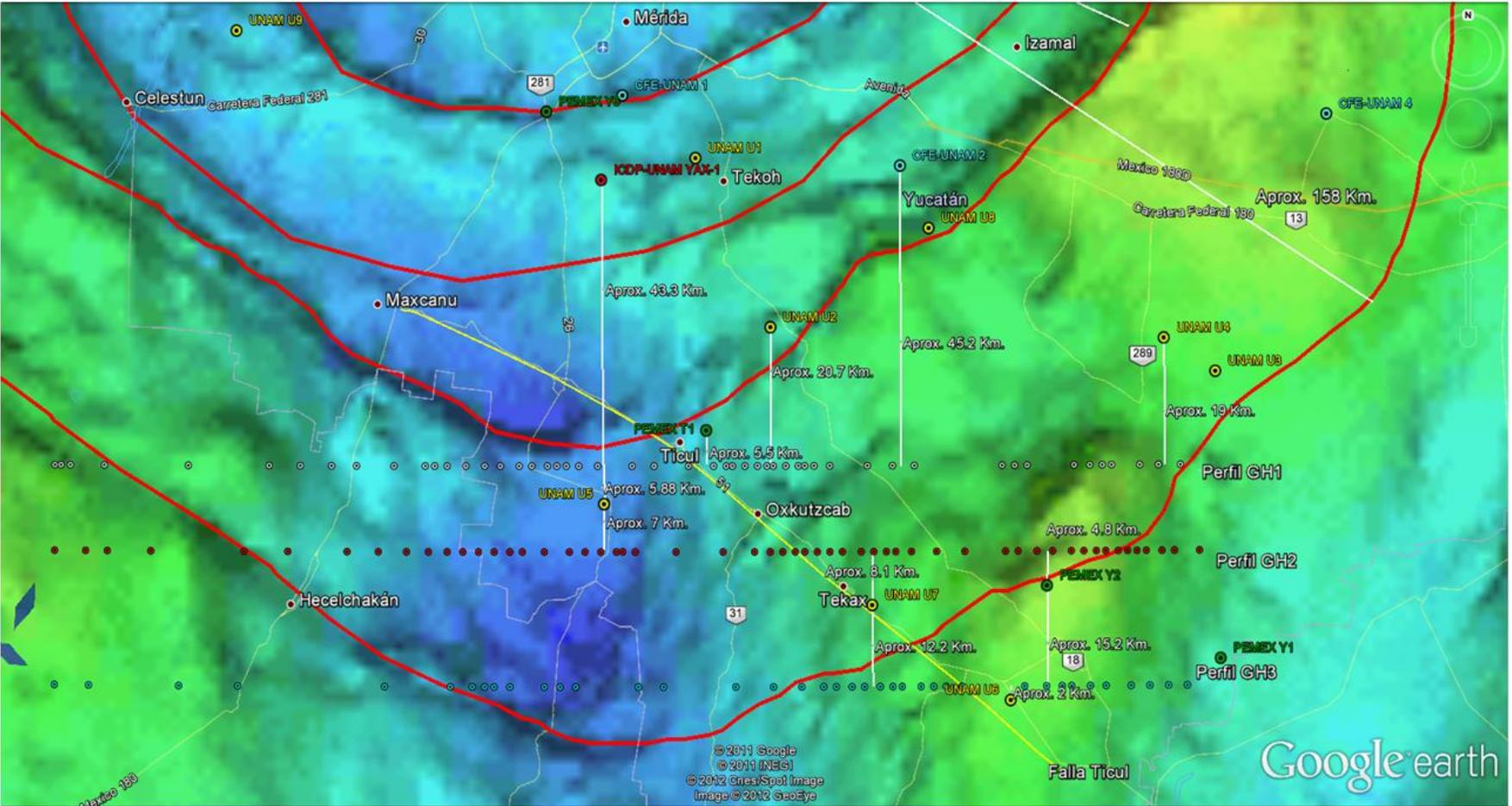


Figura 20.- Imagen de las distancias aproximadas entre los pozos de perforación de diferentes compañías a los perfiles GH1, GH2 y GH3.

Nombre	ICDP- UNAM YAX-1	UNAM U5	PEMEX T1	UNAM U2	UNAM U7	CFE- UNAM 2	PEMEX Y2	UNAM U6	UNAM U4
Perfil GH1	43.3 Km	5.88 Km	5.5 Km	20.7 Km	-	45.2 Km	-	-	19 Km
Perfil GH2	-	7 Km	-	-	8.1 Km	-	4.8 Km	-	-
Perfil GH3	-	-	-	-	12.2 Km	-	15.2 Km	2 Km	-

**Tabla 7.-** Muestra las distancias aproximadas entre los pozos perforados y los perfiles del estudio en la zona sur del cráter Chicxulub.

Para la construcción de nuestro modelo gravimétrico, la exploración de pozos y de núcleos obtenidos en la zona, presenta la limitante de que son pozos someros en comparación de las profundidades de nuestro estudio.

En la construcción de un modelo que asemeje nuestra curva de anomalía gravimétrica, vamos a excluir todos los modelos que nos reproduzcan la misma curva pero para modelos de rocas ígneas y metamórficas, ya que en la zona sur del cráter de impacto Chicxulub no existe este tipo de litología en el subsuelo, nos vamos a confiar de hipótesis y teorías de los posibles movimientos y formaciones del lugar durante los cambios dinámicos y complejos de la Tierra alrededor del tiempo geológico (millones de años), así como de la posible geología del lugar obtenida de estudios magnetométricos que cubren la anomalía.

Podremos usar las tablas de valores de densidad de rocas sedimentarias y de sedimentos, que sean aproximados o cercanos a la geología del lugar, sin salir del límite geológico de que se trata de una plataforma carbonatada.

Los afloramientos de las eyecciones del Chicxulub encontrados alrededor del cráter extendiéndose de forma continua en la región de la península hasta la isla de Albión y otros sitios en Belice, así como en las áreas de Chetumal, que se han recuperado en 3 pozos del programa de perforación de la UNAM, nos da una posible teoría de la dirección del meteorito de impacto, que como ya antes mencionamos, la dirección de los depósitos de material es quizá la dirección de la trayectoria de impacto. Los afloramientos se encuentran a unos 360 kilómetros de distancia del centro del cráter, los cuales se agrupan en la Formación Albión.

La ocurrencia de procesos erosivos, se indican por la presencia de unidades delgadas del basamento observadas en los pozos. Las condiciones después de la formación del cráter y del material expulsado, así como del restablecimiento de la sedimentación de carbonatos han sido pobremente restringidas.

Las perforaciones de pozos han proporcionado información sobre la estratigrafía del subsuelo y la estructura, así como del material para los estudios de las propiedades físicas en laboratorio, características de impacto, litologías generadas por el impacto, así como características de los meteoritos o bólidos, así como de componentes del basamento profundo. La estratigrafía y la edad del impacto han sido estudiadas a partir de la información de pozo, la datación radiométrica, la bioestratigrafía, la estratigrafía secuencial, la polaridad magnética y los estudios de isótopos estables.

### Corrección de Bouguer

La corrección que determina Bouguer no es exacta, pero es suficiente para la precisión de nuestras mediciones. Esta inexactitud surge de considerar a la masa interpuesta como una losa plana horizontal, con un espesor igual a la altura sobre el nivel del mar por un lado, y con una densidad igual a la densidad en la superficie por el otro. Esta corrección tampoco tiene en cuenta los valles y montañas ya que son como aplanados con la aplicación de esta placa.

La corrección de Bouguer considera la atracción que ejerce el material entre la estación y el plano de referencia, este efecto fue ignorado en el cálculo de la corrección de aire libre. Si la estación se encuentra localizada en una planicie de gran extensión horizontal y de espesor uniforme, la densidad de las lecturas de la gravedad se verán incrementadas por el efecto de este bloque, entre la estación y el dato registrado. La corrección de Bouguer se deriva que al asumir que el bloque está sobre una extensión horizontal infinita, viene dado por:

$$\frac{dg_B}{dR_e} \approx \frac{dg_B}{dR_{eq}} = 2\pi\gamma\sigma \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{pies}} \right] = 0.04188 \sigma \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{metro}} \right] \quad (2.18a)$$

Donde:

$\sigma$  = densidad del bloque.

Si asumimos un promedio de densidad para las rocas de la corteza de  $2.67 \text{ g/cm}^3$ , el valor numérico es:

$$\frac{dg_B}{dR_{eq}} = 0.0341 \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{pies}} \right] = 0.112 \left[ \frac{\text{miligales}}{\text{metro}} \right] \quad (2.18b)$$

La corrección de Bouguer se aplica en el sentido opuesto a la corrección de aire libre, es decir, se resta cuando la estación está por encima del plano de referencia y viceversa.

Dos hipótesis que se hacen en la obtención de la corrección de Bouguer: en primer lugar el bloque es de densidad uniforme, en segundo lugar es de extensión horizontal infinita. Tampoco es realmente válido. Para modificar el primero, sería necesario tener un conocimiento considerable acerca de la geología local del lugar en cuanto al tipo de roca y las densidades reales. Para el segundo, debemos tener cuidado con la siguiente reducción.

Esta corrección será siempre negativa porque la placa bajo la estación aumenta el valor de la gravedad, y para llegar al nivel del mar debemos eliminarla.

Como el método gravimétrico permite determinar contrastes de densidad entre cualquier cuerpo o estructura y su entorno (Placa de Bouguer), la densidad de esta placa tiene mucha importancia ya que puede dar lugar a interpretaciones erróneas.

## **Gradiente Horizontal y Gradiente Vertical**

Esta técnica es muy simple e intuitiva, que permite revelar la textura de la anomalía resaltando las discontinuidades geológicas de cortas longitudes de onda. El gradiente horizontal se hace máximo en zonas de grandes pendientes y mínimo en zonas planas, así como de cambios abruptos de densidad, es decir, nos marca los posibles contactos entre los diferentes cuerpos geológicos que se encuentran en la corteza.

El cálculo de la primera derivada vertical acentúa las anomalías gravimétricas que se producen sobre contrastes de densidades someras y abruptas. Se ha utilizado la derivada vertical para poder ubicar cambios en propiedades de la roca, que determinan transiciones en la litología.

## **Segunda Derivada Vertical**

La primera derivada mide pendientes y la segunda derivada muestra los cambios de pendiente, es decir que mide las curvaturas del campo de gravedad en nuestro caso.

La importancia del método es que, al destacar hasta pequeños cambios de pendiente, permite separar dos cuerpos o masas que por estar cerca se muestran como una sola anomalía. Asimismo, el este método presenta los siguientes inconvenientes:

- 1) Como las segundas derivadas no están asociadas directamente con las estructuras que las causan, no es posible deducir la forma de la anomalía que las causan.
- 2) Como las derivadas segundas decrecen con las potencias de la profundidad o de la distancia de las masas, un mapa de segunda derivada anula las anomalías de masas profundas.

## **Continuación Arriba y Abajo**

Este método permite calcular las anomalías, como pueden ser observadas en una superficie paralela a la superficie pero por debajo de la observación (hacia abajo) o por encima de la superficie de observación (hacia arriba).

Funciona como un low pass filter. Se simula un mapa como si el relevamiento de datos se hubiera hecho a más altura por encima del terreno. De esta manera se minimizan los efectos de las fuentes superficiales.

La continuación arriba separa grandes longitudes de onda, no todas ellas son debidas a efectos profundos, pueden ser provocadas también por cuerpos someros. La continuación hacia arriba va a producir el suavizado de las anomalías.

La continuación hacia abajo enfatiza el efecto de las anomalías locales de poca profundidad. Esto puede llevar a mapas muy ruidosos, si el nivel de continuación es demasiado grande.

La diferencia entre la anomalía de Bouguer y la continuación arriba, nos da como resultado el residual gravimétrico.

### **Transformada de Fourier**

El método de la Transformada de Fourier, es utilizado en este trabajo de investigación para obtener las profundidades aproximadas en función de la frecuencia, dirección y de las fuentes incidentes. Para el caso de la posición y la profundidad, se utilizan modelos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, aunque estos últimos, por su complejidad, son menos confiables. Estos modelos deben ser congruentes con el conocimiento que se tenga de la geología del subsuelo o de otro método geofísico realizado previamente en la zona de estudio.

### **Espectro de Potencia**

Esta técnica se basa en el promedio de la señal de toda el área de estudio, representado una gráfica que muestra el comportamiento de la potencia de la señal con respecto a la frecuencia espacial ó número de onda. La grafica permite separar las componentes de la señal de mayor interés para el estudio que se esté realizando. Con esta técnica se podrá determinar aproximadamente la profundidad de la señal.

El Espectro de Potencia es calculado con el cuadrado del módulo de la Transformada de Fourier de la anomalía de la gravedad, la cual nos mostrará los mínimos detalles del comportamiento de la señal.

### **Cálculo de las Pendientes**

El cálculo de las pendientes a partir de las gráficas del Espectro de Potencia, nos ayudarán a calcular la profundidad de las fuentes que provocan la anomalía en el subsuelo.

### **Modelado Gravimétrico**

Como última etapa, se llevará a cabo el modelado numérico de la anomalía de interés, que consiste en proponer la geometría, la localización del cuerpo geológico causante de la anomalía y de una explicación de la historia geológica de la zona. Este puede realizarse con técnicas directas o inversas. Con la actual disponibilidad de equipo de cómputo y de algoritmos apropiados, las técnicas de inversión se han vuelto más accesibles.

La creación de un modelo geológico hipotético y el cálculo de la respuesta geofísica a este, es lo que se conoce como modelado. Un modelo creado que represente una respuesta gravimétrica o magnética similar a la real introducida al programa, no indica que sea real. Una respuesta geofísica puede tener mil representaciones modeladas que pueden o no ser reales, pero lo que marca la diferencia entre la posible realidad y lo absurdo es el uso de la geología local y de una explicación lógica de la historia geológica de la zona que permitirá tener una base solida en la creación de un modelo hipotético.

Sin embargo, en el capítulo de análisis geofísico en la parte del procesamiento o de manejo de datos, se describen detalles adicionales sobre cada uno de los métodos usados.

# **Capítulo IV**

## **Análisis Geofísico**

## ANÁLISIS GEOFÍSICO

### Adquisición

La recolección de datos gravimétricos en la zona sur del cráter de impacto Chicxulub, fue realizada por proyectos de investigación a cargo del Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi del Instituto de Geofísica, estos datos adquiridos, así como el manejo de estos, son de una combinación de datos registrados en la zona y de interpolaciones realizadas en lugares de difícil acceso, por tal razón las distancias entre puntos no es equidistante. Como ya se mencionó, el manejo de los datos gravimétricos se realizó con una corrección de Bouguer simple, debido a que la topografía es plana en la plataforma de Yucatán. Estos perfiles se dividieron en Perfil GH1, Perfil GH2 y Perfil GH3, las líneas gravimétricas tienen una dirección oeste-este W-E, que parten del noreste NE del estado de Campeche y terminan en el oeste W del estado de Yucatán. Las líneas gravimétricas tienen una elevación aproximada y promedio de  $0 \pm 34$  metros sobre el nivel del mar.

El perfil GH1 está ubicado aproximadamente a 5.1 kilómetros al noroeste NW de la ciudad de Neyac en el estado de Campeche, donde se obtuvieron 51 datos para el perfil GH1 y que terminó aproximadamente a 8.17 kilómetros al noroeste NW de la ciudad de Tiholop en el estado de Yucatán, esta línea de adquisición atraviesa la falla de Ticul a 4.28 kilómetros al sur S de la ciudad de Ticul en el estado de Yucatán y que tiene una longitud aproximada de 180 kilómetros. La línea del perfil GH1 se encuentra en las coordenadas del punto inicial  $20^{\circ}22'0.00''$  Norte,  $90^{\circ}30'0.00''$  Oeste, a una elevación de 0 metros sobre el nivel del mar y el punto final en las coordenadas  $20^{\circ}22'0.00''$  Norte,  $88^{\circ}46'9.23''$  Oeste, a una elevación de 30 metros.

El perfil GH2 está ubicado a 9.78 kilómetros al norte N de la ciudad de Nitun en el estado de Campeche, donde se obtuvieron 55 datos para el perfil GH2 y que terminó aproximadamente a 7.99 kilómetros al este E de la ciudad de Dzibac en el estado de Yucatán, esta línea de adquisición atraviesa también la falla de Ticul a 1.68 kilómetros al sur S de la ciudad de Akil y a 5.30 kilómetros al norte N de la ciudad de Tekax en el estado de Yucatán y que tiene una longitud aproximada de 184 kilómetros. La línea del perfil GH2 se encuentra en las coordenadas del punto inicial  $20^{\circ}15'0.00''$  Norte,  $90^{\circ}30'0.00''$  Oeste, a una elevación de 0 metros sobre el nivel del mar y el punto final en las coordenadas  $20^{\circ}15'0.00''$  Norte,  $88^{\circ}44'25.38''$  Oeste, a una elevación de 32 metros.

El perfil GH3 está ubicado a 1.34 kilómetros al noroeste NW de la ciudad de El Cuyo en el estado de Campeche, donde se obtuvieron 39 datos para el perfil GH3 y que terminó aproximadamente a 4.67 kilómetros al sur S de la ciudad de Dzonotchel en el estado de Yucatán, esta línea de adquisición atraviesa la falla de Ticul a unos 5.95 kilómetros al oeste W de la ciudad de Tzucacab en el estado de Yucatán y que tiene una longitud de aproximadamente de 182 kilómetros. La línea del perfil GH3 se encuentra en las coordenadas del punto inicial  $20^{\circ}3'59.98''$  Norte,  $90^{\circ}30'0.00''$  Oeste, a una elevación de 0 metros sobre el nivel del mar y el punto final en las coordenadas  $20^{\circ}3'59.01''$  Norte,  $88^{\circ}45'34.99''$  Oeste, a una elevación de 34 metros.

Estas líneas de adquisición GH1, GH2 y GH3 se encuentran al sur del cráter de Chicxulub entre los límites del anillo exterior, esto es a 108 kilómetros, 120 kilómetros y los 141 kilómetros respectivamente desde el centro aproximado del cráter, estas distancias son obtenidas del modelo de gradiente de gravedad horizontal calculado para la anomalía gravimétrica de Bouguer en el cráter Chicxulub (tomado del Connors et al., 1996).

Las líneas de adquisición que son GH1, GH2 y GH3 tienen una elevación muy pequeña a comparación con la longitud de los perfiles, estas líneas gravimétricas tienen una elevación aproximada y promedio de  $0 \pm 34$  metros sobre el nivel del mar que ya habíamos mencionado anteriormente, a estos datos no se les va a aplicar la corrección por topografía, ya que es muy pequeña su elevación y por lo tanto vamos a despreciar el valor por topografía, quizá pueda tener algún efecto sobre el procesamiento de los datos de gravimetría si fuera una topografía bastante apreciable, pero para este caso, la topografía no tiene efecto.

Para la distancia entre cada dato obtenido del perfil GH1, se obtuvieron distancias aproximadamente de entre 1 kilómetro y 13.5 kilómetros, para cubrir los 180 kilómetros de la línea del perfil GH1. Para el perfil GH2, se obtuvieron distancias aproximadamente de 1 kilómetro y los 9.5 kilómetros, para cubrir los 184 kilómetros de la línea del perfil GH2. Para el perfil GH3, se obtuvieron distancias aproximadamente de los 2 kilómetros y los 23.5 kilómetros, para cubrir los 182 kilómetros de la línea del perfil GH3. La Figura 21 muestra el posicionamiento de cada perfil, la falla de Ticul, los límites de anillo exterior del cráter de Chicxulub y los poblados más cercanos al lugar de estudio.

La distancia entre cada perfil es de 12.5 kilómetros aproximadamente entre el perfil GH1 y el Perfil GH2, la distancia entre el perfil GH2 y el perfil GH3 es de aproximadamente 20.5 kilómetros.

Los perfiles y las distancias se planearon para cubrir la mayor parte de la zona sur del cráter de Chicxulub, para ser más exactos, la estructura pre-existente en la zona sur del cráter de Chicxulub observada con anterioridad por modelos gravimétricos en la zona, la falla de Ticul observada por imágenes de interferometría, así como del contacto entre ellas.

Con la ayuda de una hipótesis de posible zona de sutura, que quizá se pudiera emplear o relacionar con estas estructuras pre-existentes y de acuerdo con los movimientos de la Tierra hace millones de años, emplearemos un posible modelo gravitacional de la zona sur del cráter de Chicxulub, con esto una mejor interpretación de estos modelos y de las estructuras pre-existentes del lugar de estudio.



**Figura 21.-** Imagen del tendido de los perfiles GH1, GH2 y GH3, traslapados en la imagen del mapa base de la interferometría de radar de banda C, Shuttle Radar Topography Mission Tierra (Cortesía de NASA / JPL-Caltech). Se muestra la posición de cada uno de los datos para cada perfil. Se observa la falla de Ticul (color amarillo). Los límites del anillo exterior del cráter de Chicxulub (color Rojo) que se encuentran aproximadamente a 102 kilómetros y 144 kilómetros desde el centro del cráter. Se muestran los poblados más cercanos a las líneas de adquisición.

**Procesamiento**

El manejo de los datos gravimétricos nos ayuda a obtener los datos ajustados de la gravedad observada, estos cálculos y correcciones se realizan con una simple hoja de cálculo aplicando la anomalía de Bouguer simple, esta corrección no aplica la corrección por topografía (la zona de estudio tiene una elevación muy pequeña en comparación con los datos obtenidos en la línea de adquisición, por lo que esta elevación puede ser despreciada).

Las Tabla 8, Tabla 9 y la Tabla 10 muestran los datos del perfil GH1, el perfil GH2 y el perfil GH3 respectivamente obtenidos después de aplicar la corrección de Bouguer simple a cada línea de adquisición de los datos gravimétricos en Chicxulub.

Perfil GH1 de: 90° 30' W, 20°22' N a: 88°45'W, 20°22' N													
d (cm)	d (km)	dg (km)	dg (mg)	Long (x)	Lat (y)	Obs	d (cm)	d (km)	dg (km)	dg (mg)	Long (x)	Lat (y)	Obs
0.2	1	1	180	90.49038	20.36667	Inicio	0.8	4	105.5	-160	89.48557	20.3667	
0.3	1.5	2.5	200	90.47596	20.36667		0.4	2	107.5	-140	89.46634	20.3667	
1.1	5.5	8	200	90.42307	20.36667		0.2	1	108.5	-120	89.45673	20.3667	
2.7	13.5	21.5	200	90.29326	20.36667		0.4	2	110.5	-100	89.43	20.3667	
2.6	13	34.5	220	90.16826	20.36667		0.4	2	112.5	-80	89.41826	20.3667	
1	5	39.5	220	90.12019	20.36667		0.3	1.5	114	-60	89.40384	20.3667	
1	5	44.5	220	90.07211	20.36667		0.2	1	115	-40	89.39423	20.3667	
0.8	4	48.5	180	90.03365	20.36667		0.4	2	117	-20	89.3	20.3667	
1.2	6	54.5	120	89.97596	20.36667		0.4	2	119	0	89.35576	20.3667	
1	5	59.5	100	89.92788	20.36667		0.2	1	120	20	89.34615	20.3667	
0.3	1.5	61	80	89.91346	20.36667		0.3	1.5	121.5	40	89.33173	20.3667	
0.4	2	63	60	89.89423	20.36667		0.5	2.5	124	60	89.30769	20.3667	
0.6	3	66	40	89.86538	20.36667		1.2	6	130	80	89.2	20.3667	
0.6	3	69	20	89.83653	20.36667		0.8	4	134	100	89.21153	20.3667	
0.5	2.5	71.5	0	89.8	20.36667		0.7	3.5	137.5	120	89.17788	20.3667	
0.6	3	74.5	-20	89.78365	20.36667		2.8	14	151.5	180	89.04326	20.3667	
0.4	2	76.5	-40	89.76442	20.36667		0.4	2	153.5	200	89.02403	20.3667	
0.5	2.5	79	-60	89.74038	20.36667		0.4	2	155.5	220	89.00480	20.3667	
0.3	1.5	80.5	-80	89.72596	20.36667		1.5	7.5	163	220	88.93269	20.3667	
0.3	1.5	82	-100	89.71153	20.36667		0.5	2.5	165.5	200	88.90865	20.3667	
0.4	2	84	-120	89.69230	20.36667		0.4	2	167.5	140	88.88942	20.3667	
0.6	3	87	-140	89.66346	20.36667		0.3	1.5	169	120	88.87	20.3667	
1.1	5.5	92.5	-160	89.61057	20.36667		0.9	4.5	173.5	100	88.83173	20.3667	
0.7	3.5	96	-180	89.57692	20.36667		0.6	3	176.5	80	88.80288	20.3667	
1.1	5.5	101.5	-180	89.52403	20.36667		0.7	3.5	180	60	88.76923	20.3667	Final

**Tabla 8.-** Datos obtenidos del perfil GH1 por la Corrección de Bouguer Simple. Muestra la distancia en metros y kilómetros de punto a punto, valores obtenidos de la diferencia de gravedad después de aplicar las correcciones y las coordenadas de cada uno de los puntos.

Perfil GH2

de: 90° 30' W, 20°15' N  
a: 88°45'W, 20°15' N

d (cm)	d (km)	d (km)	dg (mg)	Long (x)	Lat(y)	Obs	d (cm)	d (km)	d (km)	dg (mg)	Long (x)	Lat(y)	Obs
				90.5	20.25	Inicio							
1	5	5	100	90.45192	20.25		0.4	2	118.5	-60	89.36057	20.25	
0.7	3.5	8.5	120	90.41826	20.25		0.3	1.5	120	-40	89.34615	20.25	
1.4	7	15.5	180	90.35096	20.25		0.4	2	122	-20	89.3269	20.25	
3	15	30.5	200	90.20673	20.25		0.4	2	124	0	89.3076	20.25	
1.4	7	37.5	220	90.13942	20.25		0.4	2	126	20	89.28846	20.25	
1.9	9.5	47	220	90.04807	20.25		0.6	3	129	40	89.25961	20.25	
1	5	52	200	90	20.25		0.4	2	131	60	89.24038	20.25	
0.9	4.5	56.5	180	89.95673	20.25		0.4	2	133	80	89.22115	20.25	
0.7	3.5	60	120	89.92307	20.25		0.3	1.5	134.5	100	89.20673	20.25	
0.6	3	63	100	89.89423	20.25		0.5	2.5	137	120	89.18269	20.25	
0.5	2.5	65.5	80	89.87019	20.25		0.8	4	141	180	89.14423	20.25	
0.5	2.5	68	60	89.84615	20.25		0.9	4.5	145.5	200	89.10096	20.25	
0.5	2.5	70.5	40	89.82211	20.25		1.3	6.5	152	220	89.03846	20.25	
0.5	2.5	73	20	89.79807	20.25		0.4	2	154	240	89.01923	20.25	
0.4	2	75	0	89.77884	20.25		0.6	3	157	260	88.99038	20.25	
0.7	3.5	78.5	-20	89.7451	20.25		0.5	2.5	159.5	260	88.96634	20.25	
0.8	4	82.5	-40	89.70673	20.25		0.6	3	162.5	240	88.93	20.25	
0.5	2.5	85	-60	89.68269	20.25		0.4	2	164.5	220	88.91826	20.25	
0.5	2.5	87.5	-80	89.65865	20.25		0.4	2	166.5	200	88.89903	20.25	
0.5	2.5	90	-100	89.63461	20.25		0.3	1.5	168	140	88.88461	20.25	
0.2	1	91	-120	89.6	20.25		0.4	2	170	120	88.8653	20.25	
0.4	2	93	-140	89.60576	20.25		0.3	1.5	171.5	100	88.85096	20.25	
1.3	6.5	99.5	-160	89.5432	20.25		0.3	1.5	173	80	88.83653	20.25	
1.5	7.5	107	-140	89.47115	20.25		0.3	1.5	174.5	60	88.82211	20.25	
1	5	112	-120	89.42307	20.25		0.5	2.5	177	40	88.79807	20.25	
0.5	2.5	114.5	-100	89.39903	20.25		0.4	2	179	20	88.77884	20.25	
0.4	2	116.5	-80	89.37980	20.25		0.8	4	183	0	88.74038	20.25	Final

**Tabla 9.-** Datos obtenidos del perfil GH2 por la Corrección Bouguer Simple. Muestra la distancia en metros y kilómetros de punto a punto, valores obtenidos de la diferencia de gravedad después de aplicar las correcciones y las coordenadas de cada uno de los puntos.

Perfil GH3

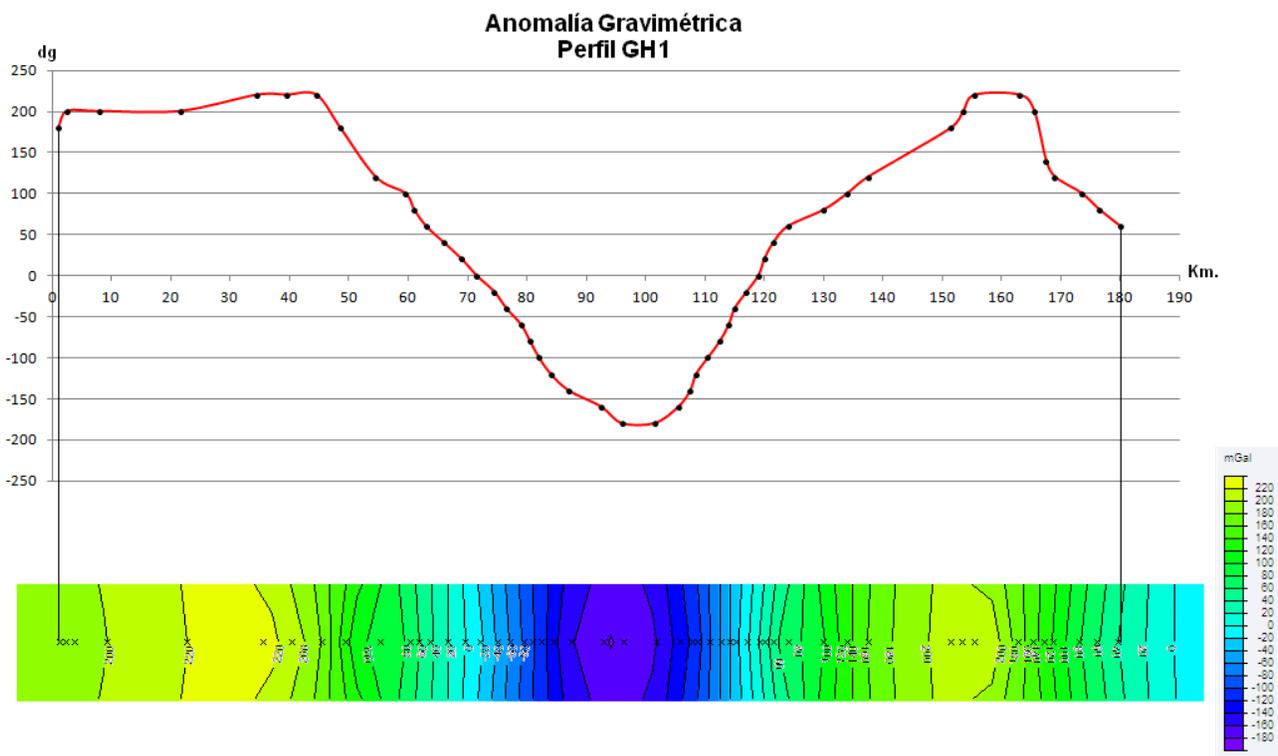
de: 90° 30' W, 20°4' N  
a: 88°45'W, 20°4' N

d (cm)	d (km)	d (km)	dg (mg)	Long(x)	Lat(y)	Obs	d (cm)	d (km)	d (km)	dg (mg)	Long(x)	Lat(y)	Obs
				90.5	20.0667	inicio							
1.1	5.5	5.5	80	90.4471	20.0667		0.5	2.5	127.5	-20	89.2741	20.0667	
2.9	14.5	20	100	90.3077	20.0667		0.4	2	129.5	0	89.2548	20.0667	
1.9	9.5	29.5	120	90.216	20.0667		0.5	2.5	132	20	89.230	20.0667	
4.7	23.5	53	120	89.9904	20.0667		0.4	2	134	40	89.211	20.0667	
2.1	10.5	63.5	100	89.8894	20.0667		0.3	1.5	135.5	60	89.197	20.0667	
0.7	3.5	67	80	89.8558	20.0667		0.6	3	138.5	80	89.1683	20.0667	
0.4	2	69	60	89.8365	20.0667		0.4	2	140.5	100	89.1491	20.0667	
0.3	1.5	70.5	40	89.8221	20.0667		0.4	2	142.5	120	89.1298	20.0667	
0.5	2.5	73	20	89.798	20.0667		0.5	2.5	145	180	89.1058	20.0667	
1.1	5.5	78.5	0	89.7452	20.0667		2	10	155	180	89.0097	20.0667	
0.5	2.5	81	-20	89.7212	20.0667		0.7	3.5	158.5	120	88.976	20.0667	
0.5	2.5	83.5	-40	89.6971	20.0667		0.5	2.5	161	100	88.952	20.0667	
2	10	93.5	-60	89.6010	20.0667		0.3	1.5	162.5	80	88.9375	20.0667	
0.8	4	97.5	-80	89.5625	20.0667		0.6	3	165.5	60	88.9087	20.0667	
2.3	11.5	109	-100	89.4519	20.0667		0.5	2.5	168	40	88.884	20.0667	
1.2	6	115	-100	89.3942	20.0667		0.8	4	172	20	88.846	20.0667	
0.9	4.5	119.5	-80	89.3510	20.0667		0.6	3	175	0	88.8174	20.0667	
0.7	3.5	123	-60	89.3173	20.0667		0.6	3	178	-20	88.788	20.0667	
0.4	2	125	-40	89.2981	20.0667		0.6	3	181		88.7597	20.0667	Final

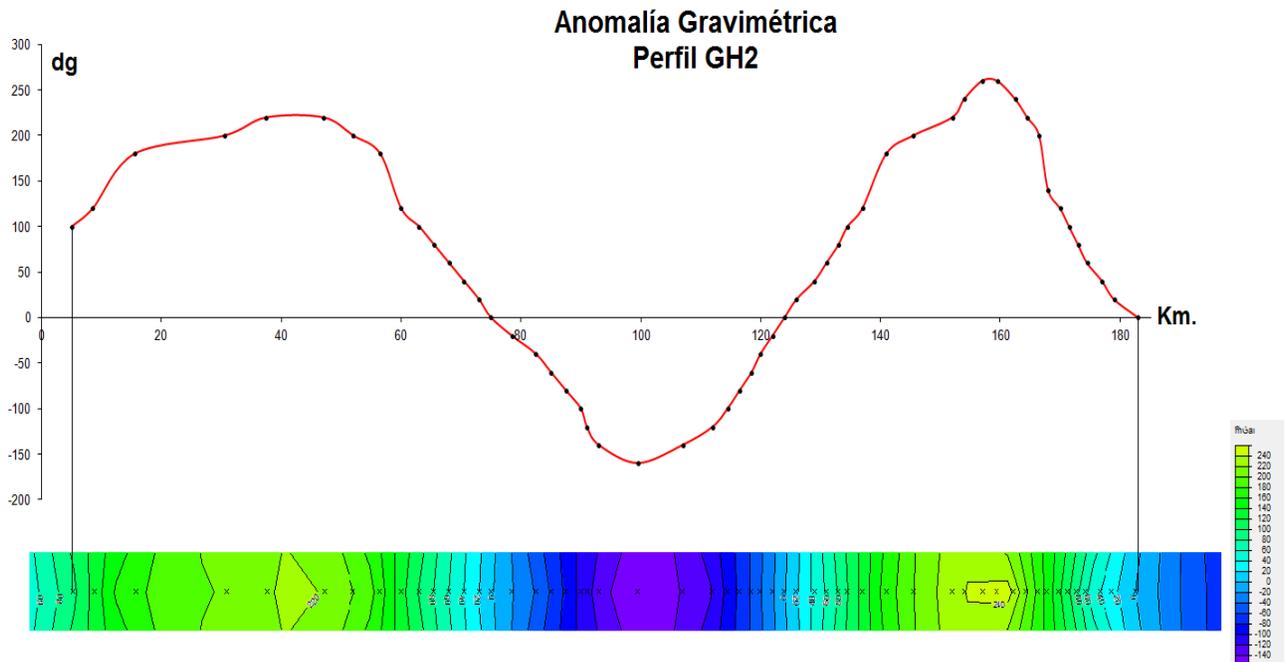
**Tabla 10.-** Datos obtenidos del perfil GH3 por la Corrección Bouguer Simple. Muestra la distancia en metros y kilómetros de punto a punto, valores obtenidos de la diferencia de gravedad después de aplicar las correcciones y las coordenadas de cada uno de los puntos.

En esta parte del manejo de los datos, se obtuvieron las gráficas de las Anomalías Gravimétricas de la gravedad observada obtenida para cada punto, también se obtiene cada una de las mallas de la anomalía de Bouguer parecida a las obtenidas por la representación oblicua en 3-D del mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer en el cráter de Chicxulub (Sharpton et al., 1993) (Figura 2).

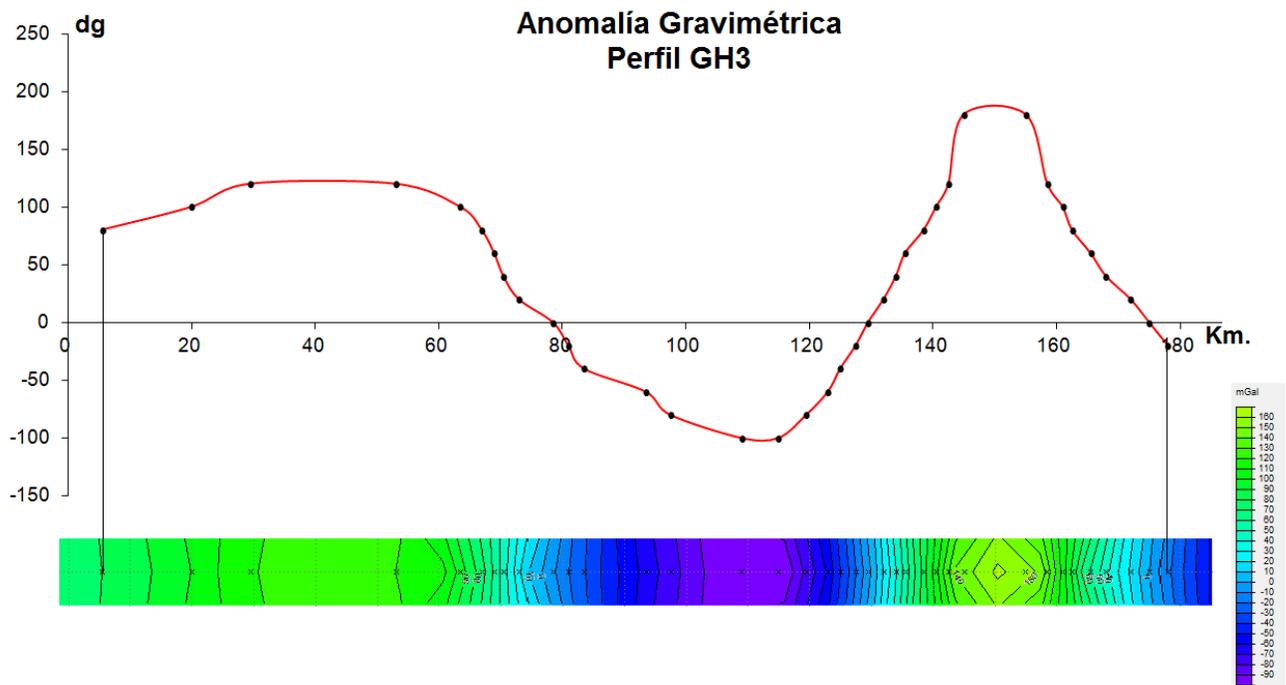
Esta imagen es comparada con la anomalía circular concéntrica máxima en la zona central del cráter de Chicxulub con la (Figura 20) y son llamados los datos de la gravedad observada. Las Figura 22, Figura 23 y Figura 24 muestran las mallas de las anomalías gravimétricas de Bouguer para el perfil GH1, el perfil GH2 y el perfil GH3, así como de sus gráficos obtenidos.



**Figura 22.- Perfil GH1.** (Superior) Gráfica de los datos de la anomalía gravimétrica de Bouguer simple. (Inferior) Malla de la anomalía Gravimétrica del perfil GH1 obtenida de las correcciones y el manejo de los datos obtenidos en campo de la zona sur del cráter de Chicxulub.



**Figura 23.- Perfil GH2.** (Superior) Gráfica de los datos de la anomalía gravimétrica de Bouguer simple. (Inferior) Malla de la anomalía Gravimétrica del perfil GH2 obtenida de las correcciones y el manejo de los datos obtenidos en campo de la zona sur del cráter de Chicxulub.



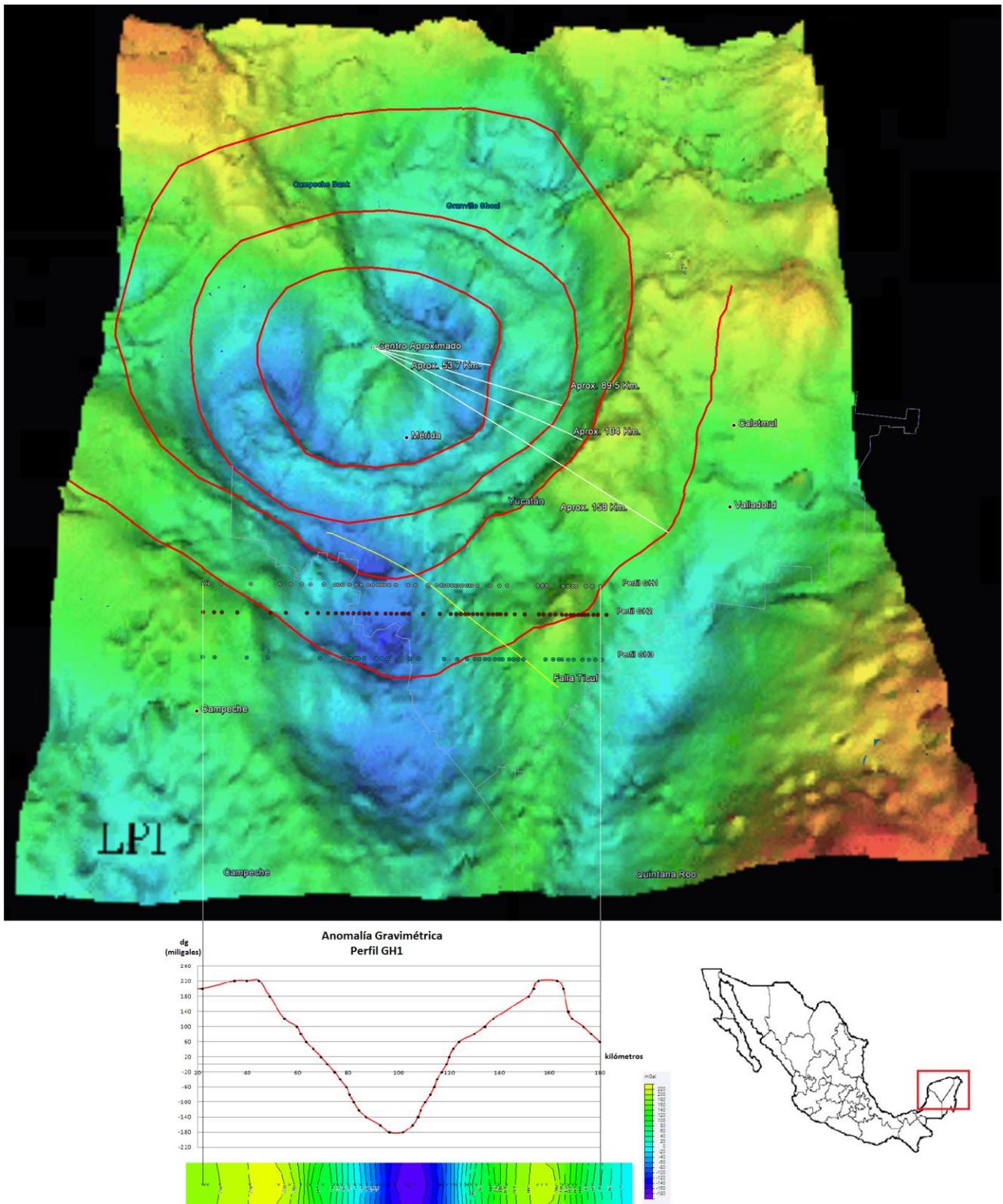
**Figura 24.- Perfil GH3.** (Superior) Gráfica de los datos de la anomalía gravimétrica de Bouguer simple. (Inferior) Malla de la anomalía Gravimétrica del perfil GH3 obtenida de las correcciones y el manejo de los datos obtenidos en campo de la zona sur del cráter de Chicxulub.

Las gráficas obtenidas en cada perfil, se obtienen al realizar la corrección de Bouguer simple, que son llamados valores de la gravedad observada para cada uno de los puntos tomados de la línea de adquisición, estas gráficas nos dan a grandes rasgos el valor de la gravedad, el posicionamiento de cada uno de los datos adquiridos en campo y su distancia entre cada uno de los puntos de la línea de adquisición (Figura 22, Figura 23 y Figura 24 parte superior).

Las anomalías gravimétricas para cada perfil se obtuvieron con los datos de los valores de la gravedad observada, con estos datos se hace una malla en el programa WinGLink, la cual nos va a mostrar el modelo del perfil de la gravedad observada para cada uno de los perfiles (Figura 22, Figura 23 y Figura 24 parte inferior).

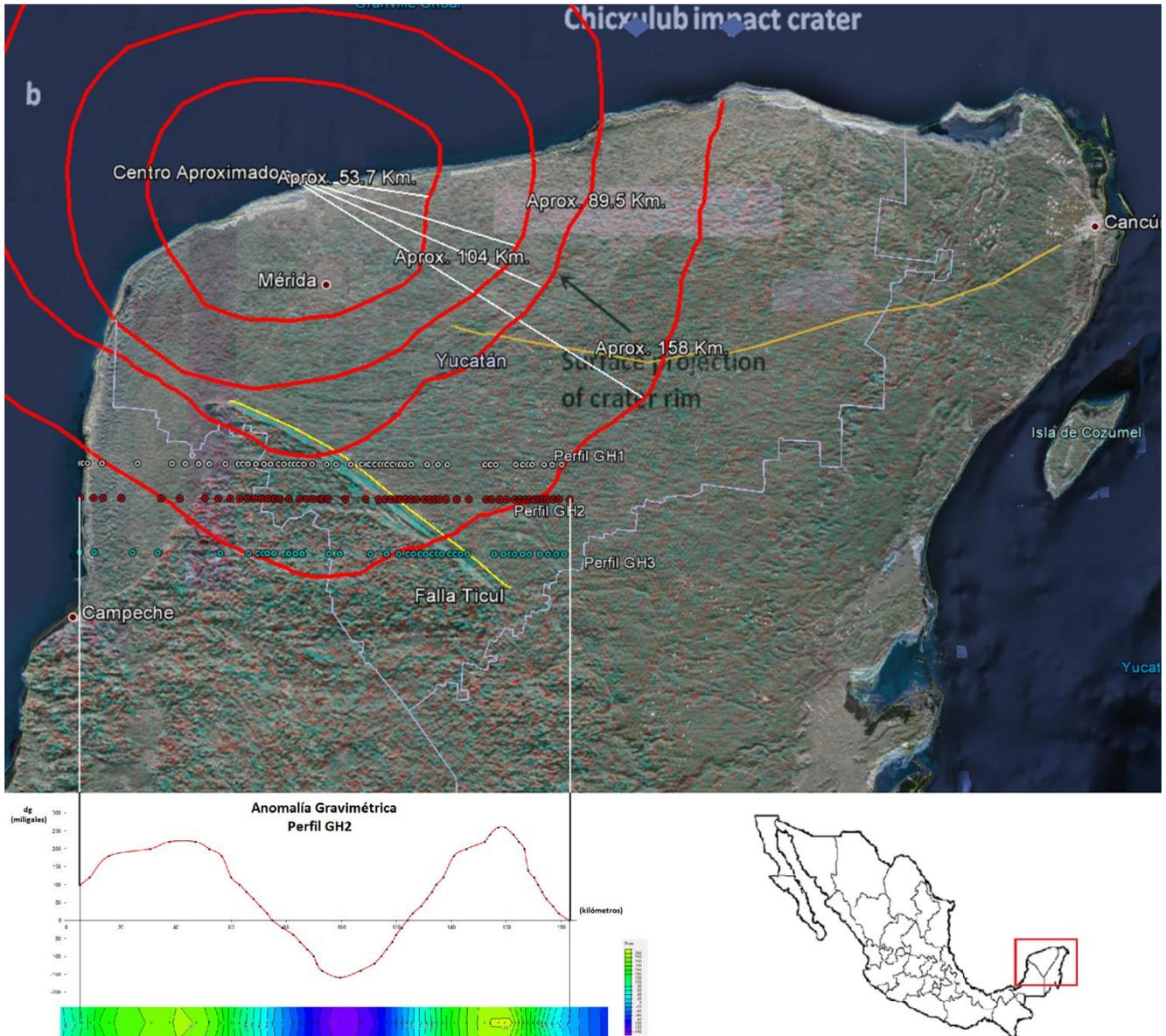
Las figuras anteriores de anomalías gravimétricas de cada perfil se pueden traslapar con la imagen de la representación oblicua en 3-D de anomalías gravimétricas de Bouguer en el cráter de Chicxulub (Sharpton et al., 1993) (figura 2), para comprobar que los datos obtenidos por la corrección de Bouguer simple son similares, esto nos da una muestra de que los datos obtenidos de la zona de nuestro estudio son aceptables.

La imagen de la Figura 25 traslapa solo el perfil GH1 para observar la relación que tiene nuestro perfil obtenido con la imagen de la representación oblicua en 3-D del mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer en el cráter de Chicxulub (Sharpton et al., 1993).



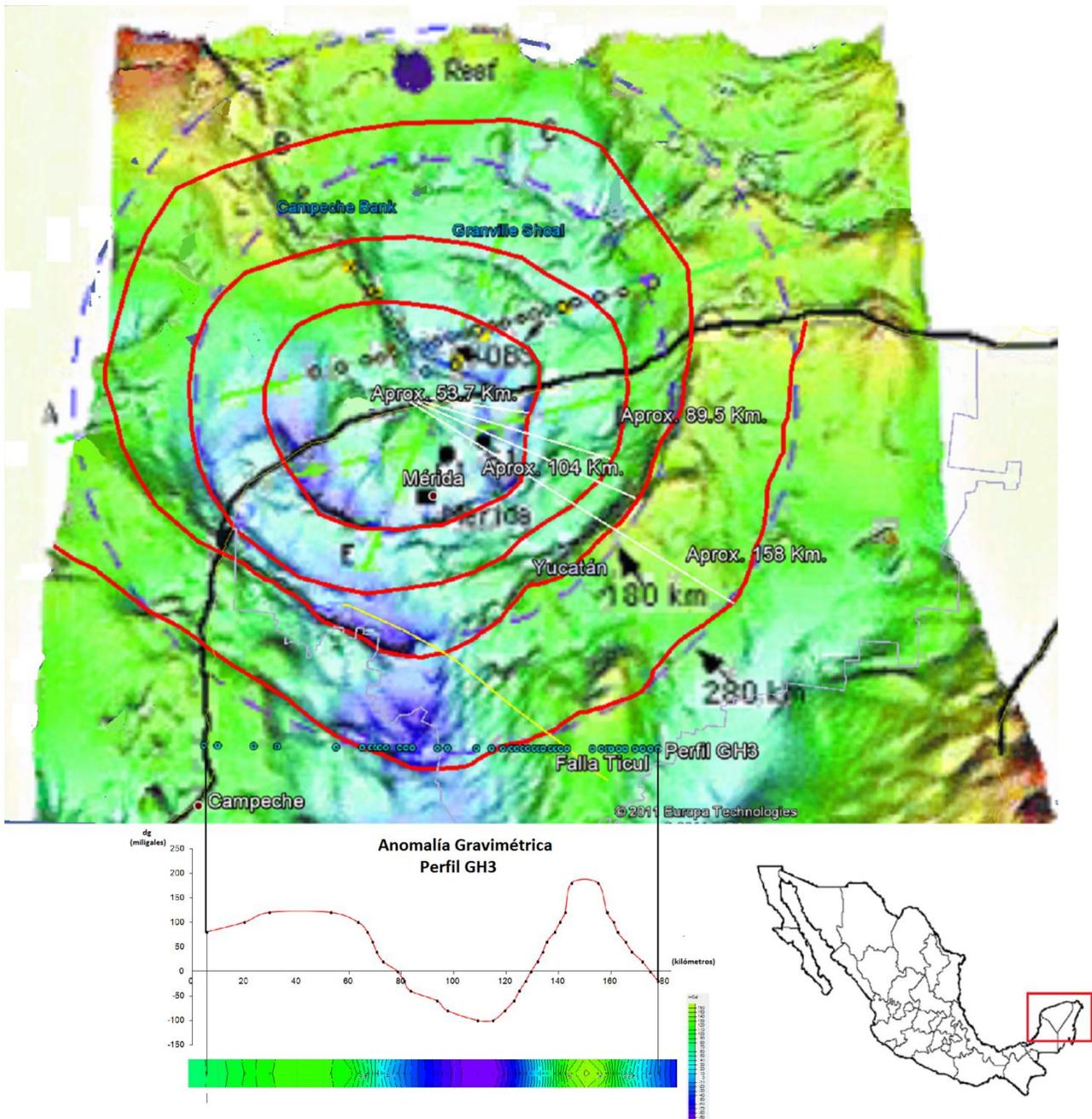
**Figura 25.-** Imagen de la gráfica de valores de gravedad observada y la anomalía gravimétrica de Bouguer del perfil GH1, traslapada con la imagen de la representación oblicua en 3-D del mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer en el cráter de Chicxulub (Sharpton et al., 1993).

En el manejo de los datos, también se realizó el traslape de la gráfica de los valores de gravedad y la anomalía gravimétrica de Bouguer solo del perfil GH2 con la imagen del mapa base de la interferometría de radar de banda C, Shuttle Radar Topography Mission Tierra (Cortesía de NASA / JPL-Caltech), esto para observar la relación que tienen las diferentes imágenes de estudios previos del cráter de Chicxulub (Figura 26).



**Figura 26.-** Imagen de la gráfica de valores de gravedad observada y la anomalía gravimétrica de Bouguer del perfil GH2, traslapada con la imagen del mapa base de la interferometría de radar de banda C, Shuttle Radar Topography Mission Tierra (Cortesía de NASA / JPL-Caltech).

También se realizó el traslape de la gráfica de valores de la gravedad observada y de la anomalía gravimétrica de Bouguer para el perfil GH3 con la imagen de la representación oblicua en 3-D del mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer en el cráter de Chicxulub (Lunar and Planetary Institute, en Houston).



**Figura 27.-** Imagen de la gráfica de valores de gravedad observada y la anomalía gravimétrica de Bouguer del perfil GH3, traslapada con la representación de anomalías gravimétricas de Bouguer en el cráter de Chicxulub (Lunar and Planetary Institute, en Houston). Se observan los anillos interior y exterior, su distancia radial, la falla de Ticul, la superposición del perfil GH1 y la adquisición marina de datos sísmicos.

Este traslape en las imágenes de anomalía gravimétrica de Bouguer en el cráter de Chicxulub y en la imagen del mapa base de interferometría de radar, nos ayudará a posicionar nuestras 3 líneas de perfiles de adquisición, así como de comparar los valores obtenidos en nuestros cálculos con modelos antes propuestos. Todas estas imágenes comparativas con nuestros datos, nos dan una confiable muestra de que obtuvimos valores aceptables a lo obtenido por otros autores.

En el manejo de los datos geofísicos se realizó el cálculo de la primera derivada horizontal y vertical, así como de la segunda derivada vertical para cada uno de los perfiles.

Con la gráfica del cálculo de gradiente horizontal, observaremos el comportamiento de la gráfica, en este caso si la tendencia de la grafica es un máximo, nos muestra que es una zona de grandes pendientes en los cuerpos geológicos en el subsuelo y que para una tendencia de la grafica mínima, nos muestra una zona plana.

La primera derivada vertical ubica los cambios en las propiedades de la roca, que determinan las transiciones en la litología.

La segunda derivada vertical mide las curvaturas del campo de gravedad. Destaca pequeños cambios de pendiente, que permite separar dos cuerpos o masas, que por estar cercanos se muestran como una sola anomalía.

Las siguientes tablas nos muestran los valores obtenidos de los gradientes horizontales y verticales, así como de la segunda derivada vertical para el perfil GH1, el perfil GH2 y el perfil GH3 respectivamente (Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13).

Distancia	dg	1ra. Der. Horiz.	1ra. Der. Vertical	2da. Der. Vertical	Distancia	dg	1ra. Der. Horiz.	1ra. Der. Vertical	2da. Der. Vertical
0	180	0.88	4.223	0.162	105.5	-160	8.237	-12.115	-0.308
1	180	0.959	4.01	0.128	107.5	-140	9.491	-10.977	-0.341
2.5	200	1.055	3.54	0.043	108.5	-120	10.062	-10.159	-0.336
8	200	1.282	2.208	-0.209	110.5	-100	11.127	-8.021	-0.291
21.5	200	1.239	4.065	-0.191	112.5	-80	11.875	-5.459	-0.196
34.5	220	1.702	8.772	-0.007	114	-60	12.134	-3.413	-0.091
39.5	220	5.607	11.388	0.764	115	-40	12.129	-2.049	-0.005
44.5	220	8.631	7.708	0.688	117	-20	11.525	1.125	0.313
48.5	180	7.916	-3.904	-1.214	119	0	10.412	4.211	0.665
54.5	120	5.856	-0.528	-0.155	120	20	9.776	5.484	0.808
59.5	100	5.67	4.592	0.877	121.5	40	8.845	6.803	0.934
61	80	6.19	2.943	0.487	124	60	7.764	6.015	0.632
63	60	6.98	0.29	-0.11	130	80	6.558	-0.388	-0.76
66	40	7.725	-1.678	-0.453	134	100	6.68	3.604	-0.149
69	20	7.836	-0.737	-0.015	137.5	120	6.329	7.14	0.361
71.5	0	7.91	0.002	0.395	151.5	180	1.554	8.338	-0.209
74.5	-20	8.612	-0.795	0.48	153.5	200	1.975	10.76	0.217
76.5	-40	9.139	-2.061	0.396	155.5	220	2.782	13.266	0.709
79	-60	9.411	-4.296	0.214	163	220	7.656	7.066	0.125
80.5	-80	9.237	-6.105	0.083	165.5	200	8.873	2.163	-0.452
82	-100	8.836	-8.189	-0.07	167.5	140	8.947	0.193	-0.488
84	-120	7.982	-10.983	-0.27	169	120	8.653	-0.777	-0.403
87	-140	6.006	-14.071	-0.452	173.5	100	7.135	-2.632	-0.112
92.5	-160	0.885	-15.12	-0.319	176.5	80	6.263	-3.969	-0.215
96	-180	1.067	-14.742	-0.223	180	60	5.313	-4.854	-0.295
101.5	-180	5.355	-13.247	-0.185					

**Tabla 11.- Perfil GH1.** Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para la 1ra. Derivada Horizontal, la 1ra. Derivada Vertical y la 2da. Derivada Vertical. Muestra la distancia entre cada punto de la línea de adquisición, el valor de la gravedad observada, los valores de la primera derivada horizontal, valores de la primera y segunda derivada vertical.

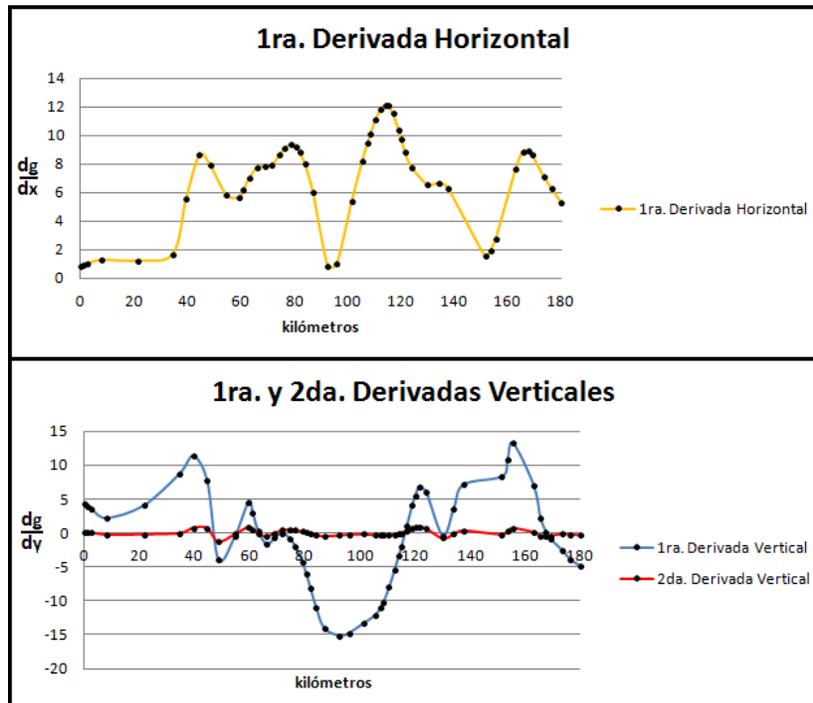
Distancia	dg	1ra. Der. Horiz.	1ra. Der. Vertical	2da. Der. Vertical	Distancia	dg	1ra. Der. Horiz.	1ra. Der. Vertical	2da. Der. Vertical
5	100	7.783	-1.944	-0.956	118.5	-60	9.626	-4.892	0.108
8.5	120	8.041	3.416	0.59	120	-40	9.857	-3.634	0.342
15.5	180	4.598	8.124	1.436	122	-20	9.863	-2.345	0.471
30.5	200	1.632	2.687	-0.869	124	0	9.709	-1.382	0.452
37.5	220	1.294	6.192	0.174	126	20	9.577	-0.723	0.307
47	220	2.291	9.307	0.655	129	40	9.919	-0.708	-0.279
52	200	5.8	11.444	2	131	60	10.153	-0.706	-0.671
56.5	180	8.6	8.769	1.629	133	80	10.248	-0.153	-0.838
60	120	9.524	1.873	-0.674	134.5	100	10.196	1.241	-0.574
63	100	9.522	-1.676	-1.568	137	120	9.881	4.422	0.215
65.5	80	8.973	-1.552	-0.939	141	180	8.713	8.57	1.145
68	60	8.213	-0.752	-0.086	145.5	200	6.469	9.177	0.653
70.5	40	7.609	-1.183	0.042	152	220	3.056	10.525	-0.021
73	20	7.164	-2.617	-0.435	154	240	2.648	11.804	0.256
75	0	6.932	-3.569	-0.758	157	260	3.41	16.939	2.319
78.5	-20	6.926	-2.698	-0.089	159.5	260	5.055	21.32	4.358
82.5	-40	7.327	-0.552	1.36	162.5	240	7.858	21.126	4.824
85	-60	7.729	-1.681	1.306	164.5	220	10.307	16.11	3.249
87.5	-80	8.097	-4.555	0.569	166.5	200	12.579	9.545	1.15
90	-100	7.912	-7.909	-0.373	168	140	13.784	4.671	-0.347
91	-120	7.487	-9.175	-0.725	170	120	14.077	-0.126	-1.555
93	-140	6.02	-11.688	-1.427	171.5	100	13.452	-2.818	-2.025
99.5	-160	1.933	-14.571	-1.871	173	80	12.414	-4.951	-2.27
107	-140	3.583	-10.956	-0.56	174.5	60	11.175	-6.49	-2.326
112	-120	6.668	-11.784	-1.667	177	40	9.329	-7.663	-2.131
114.5	-100	8.028	-9.558	-1.13	179	20	8.055	-7.349	-1.716
116.5	-80	8.957	-7.187	-0.483	183	0	6.002	-5.494	-0.636

**Tabla 12.- Perfil GH2.** Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para la 1ra. Derivada Horizontal, la 1ra. Derivada Vertical y la 2da. Derivada Vertical. Muestra la distancia entre cada punto de la línea de adquisición, el valor de la gravedad observada, los valores de la primera derivada horizontal, valores de la primera y segunda derivada vertical.

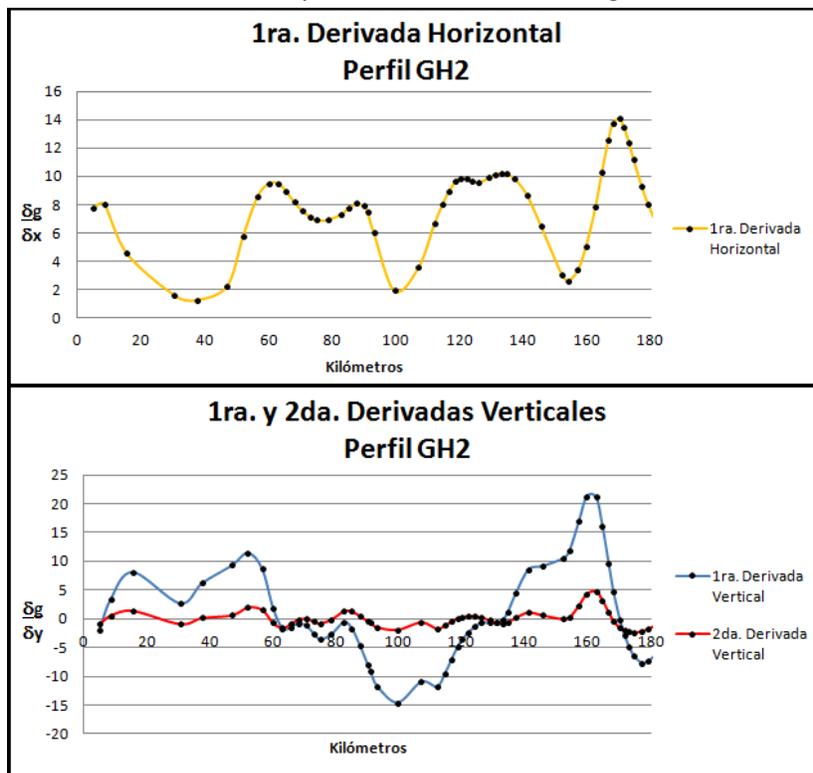
Distancia	dg	1ra. Der. Horiz.	1ra. Der. Vertical	2da. Der. Vertical	Distancia	dg	1ra. Der. Horiz.	1ra. Der. Vertical	2da. Der. Vertical
5.5	80	1.123	0.452	-0.253	127.5	-20	8.585	-3.826	-0.34
20	100	1.964	0.68	-0.387	129.5	0	9	-2.526	-0.249
29.5	120	1.318	3.315	0.378	132	20	9.744	-1.627	-0.575
53	120	0.693	3.34	-0.24	134	40	10.196	-0.864	-0.878
63.5	100	5.403	7.281	1.673	135.5	60	10.323	0.055	-0.955
67	80	7.341	4.386	0.978	138.5	80	9.838	4.244	0.004
69	60	7.718	1.987	0.297	140.5	100	8.981	8.165	1.193
70.5	40	7.655	-0.124	-0.332	142.5	120	7.749	11.648	2.243
73	20	7.123	-3.37	-1.268	145	180	5.365	13.513	2.472
78.5	0	5.169	-4.329	-0.896	155	180	4.408	14.773	2.942
81	-20	4.265	-3.304	-0.233	158.5	120	7.676	11.697	2.501
83.5	-40	3.778	-3.137	-0.057	161	100	8.78	4.918	0.215
93.5	-60	3.089	-3.417	0.159	162.5	80	9.092	0.753	-1.181
97.5	-80	2.792	-4.042	0.122	165.5	60	8.806	-3.794	-2.333
109	-100	0.638	-7.112	-0.322	168	40	7.695	-3.569	-1.563
115	-100	2.503	-10.047	-1.448	172	20	6.096	-2.354	-0.148
119.5	-80	5.15	-9.032	-1.311	175	0	5.995	-3.079	-0.015
123	-60	7.167	-6.801	-0.827	178	-20	5.438	-4.329	-0.21
125	-40	7.912	-5.524	-0.588					

**Tabla 13.- Perfil GH3.** Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para la 1ra. Derivada Horizontal, la 1ra. Derivada Vertical y la 2da. Derivada Vertical. Muestra la distancia entre cada punto de la línea de adquisición, el valor de la gravedad observada, los valores de la primera derivada horizontal, valores de la primera y segunda derivada vertical.

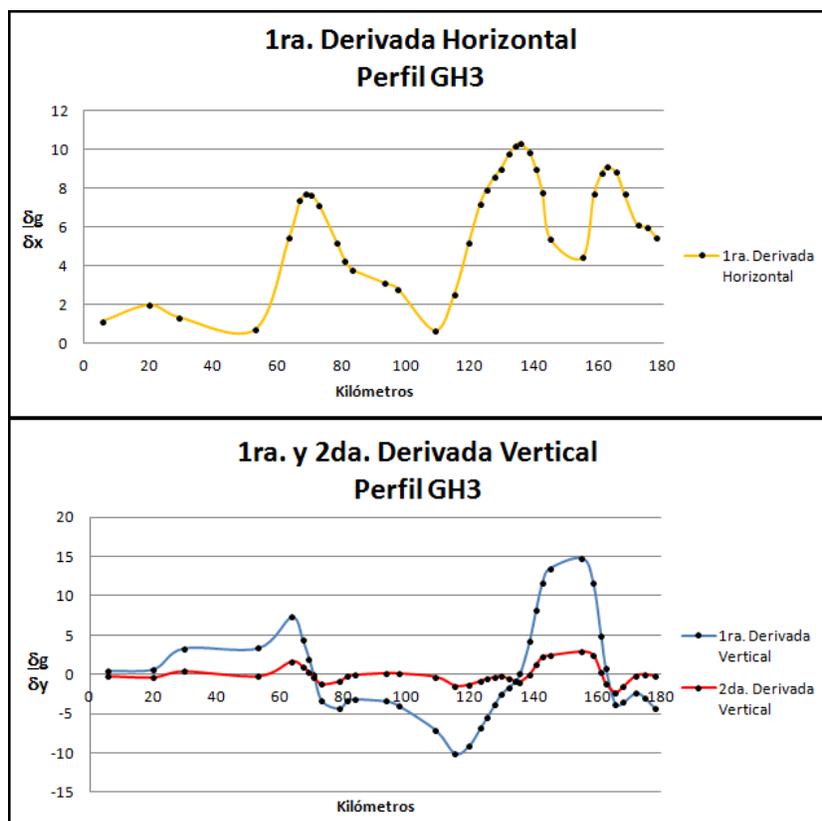
Las siguientes imágenes nos muestra las gráficas de las derivadas horizontales y verticales, así como de su segunda derivada vertical para el perfil GH1, perfil GH2 y el perfil GH3 respectivamente (Figura 28, Figura 29 y Figura 30).



**Figura 28.- Perfil GH1.** Imagen de las gráficas de las derivadas horizontales y verticales, así como de su segunda derivada vertical aplicadas a los valores de gravedad observada.



**Figura 29.- Perfil GH2.** Imagen de las gráficas de las derivadas horizontales y verticales, así como de su segunda derivada vertical aplicadas a los valores de gravedad observada.



**Figura 30.- Perfil GH3.** Imagen de las gráficas de las derivadas horizontales y verticales, así como de su segunda derivada vertical aplicadas a los valores de gravedad observada.

El siguiente método empleado para el manejo de los datos geofísicos es el cálculo de la continuación arriba y la continuación abajo para cada uno de los perfiles, esto se realiza en la parte del tratamiento de perfiles con el programa WinGLink.

El comportamiento de la gráfica de la continuación abajo, nos indican que si la señal en la gráfica se va modificando muy lentamente significa que las fuentes que provocan dicha anomalía son profundas, en el caso en que la señal de la grafica se modifica muy rápidamente, esto es que cambia radicalmente su comportamiento significa que las fuentes que provocan dicha anomalía son someras.

Para el comportamiento de la grafica de la continuación arriba solo va a producir el suavizado de la anomalía gravimétrica.

Las siguientes tablas nos muestran los valores obtenidos de las continuaciones arriba y las continuaciones abajo para el perfil GH1, el perfil GH2 y el perfil GH3 respectivamente (Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16).

Distancia	dg	Continuación Arriba			Continuación Abajo		
		14.398 Km	10 Km	5 Km	-5 Km	-10 Km	-14.398 Km
0	180	149.026	160.576	175.472	286.375	744.505	3382.498
1	180	150.758	162.326	176.949	286.318	728.131	3193.771
2.5	200	153.102	164.71	179.103	280.642	626.823	2329.532
8	200	159.682	171.653	186.296	257.767	206.474	-1056.244
21.5	200	166.214	180.792	199.679	300.772	357.585	-364.912
34.5	220	153.485	169.646	193.885	332.048	412.995	-507.865
39.5	220	141.184	155.642	178.161	355.06	803.905	2305.304
44.5	220	124.751	135.778	152.03	284.608	758.658	3186.062
48.5	180	109.37	116.818	125.093	85.104	-363.188	-3135.494
54.5	120	84.461	87.752	91.503	94.167	103.892	296.452
59.5	100	62.579	62.824	64.715	124.477	539.998	3077.641
61	80	55.871	55.094	55.639	82.088	272.911	1388.624
63	60	46.848	44.631	43.155	18.657	-125.249	-1090.728
66	40	33.222	28.679	24.155	-41.079	-392.102	-2508.77
69	20	19.537	12.466	4.958	-50.05	-195.667	-735.297
71.5	0	8.373	-1.001	-11.421	-56.659	-10.384	876.503
74.5	-20	-4.81	-17.194	-31.818	-93.347	-51.578	838.725
76.5	-40	-13.224	-27.73	-45.555	-128.708	-166.556	200.397
79	-60	-22.914	-40.09	-62.252	-179.959	-343.87	-705.285
80.5	-80	-28.494	-47.329	-72.418	-215.501	-448.677	-1050.671
82	-100	-33.73	-54.225	-82.39	-253.631	-557.865	-1340.684
84	-120	-39.93	-62.509	-94.649	-302.741	-694.139	-1644.634
87	-140	-47.259	-72.396	-109.357	-357.147	-826.153	-1854.065
92.5	-160	-54.565	-82.321	-123.601	-382.066	-802.557	-1508.637
96	-180	-54.381	-82.247	-123.709	-377.166	-776.629	-1457.15
101.5	-180	-45.955	-71.378	-109.057	-342.186	-726.153	-1481.045
105.5	-160	-34.493	-56.445	-88.878	-300.744	-651.678	-1177.943
107.5	-140	-27.085	-46.776	-75.637	-269.921	-597.699	-1053.951
108.5	-120	-23.164	-41.64	-68.504	-251.803	-571.466	-1072.034
110.5	-100	-14.801	-30.647	-53.038	-210.009	-522.241	-1282.184
112.5	-80	-5.662	-18.673	-36.187	-161.476	-452.154	-1448.685
114	-60	1.516	-9.332	-23.144	-121.97	-376.274	-1423.492
115	-40	6.383	-3.044	-14.454	-94.665	-310.835	-1287.925
117	-20	16.118	9.461	2.768	-29.708	-71.48	-233.695
119	0	26.062	22.094	19.87	36.728	203.74	1128.015
120	20	31.042	28.358	28.174	66.424	325.423	1742.079
121.5	40	38.435	37.566	40.087	102.226	457.265	2390.459
124	60	50.422	52.185	57.774	115.452	375.614	1736.546
130	80	77.09	83.866	93.522	75.402	-233.015	-2136.701
134	100	92.955	103.014	117.66	171.341	215.779	184.35
137.5	120	104.791	117.343	136.058	248.73	569.416	1966.408
151.5	180	129.696	147.294	174.108	296.513	357.213	-215.694
153.5	200	129.88	147.38	174.818	330.185	573.107	979.919
155.5	220	128.975	146.023	173.558	363.365	814.484	2368.131
163	220	117.565	129.152	147.217	250.331	372.816	234.073
165.5	200	111.478	120.28	132.934	169.534	22.98	-1426.779
167.5	140	106.303	112.855	121.53	135.398	-4.022	-1083.541
169	120	102.125	106.929	112.648	117.198	39.805	-404.37
173.5	100	89.205	88.978	86.822	70.968	129.933	967.747
176.5	80	80.822	77.69	71.545	28.335	-74.737	-439.524
180	60	71.847	65.707	55.713	-10.563	-258.748	-1741.677

**Tabla 14.- Perfil GH1.** Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para las continuaciones arriba y las continuaciones abajo. Muestra la distancia entre cada punto de la línea de adquisición, el valor de la gravedad observada, los valores para cada una de las profundidades por default en el programa WinGLink (14.398 Km., 10 Km., 5 Km., -5Km., -10 Km., -14.398 Km.).

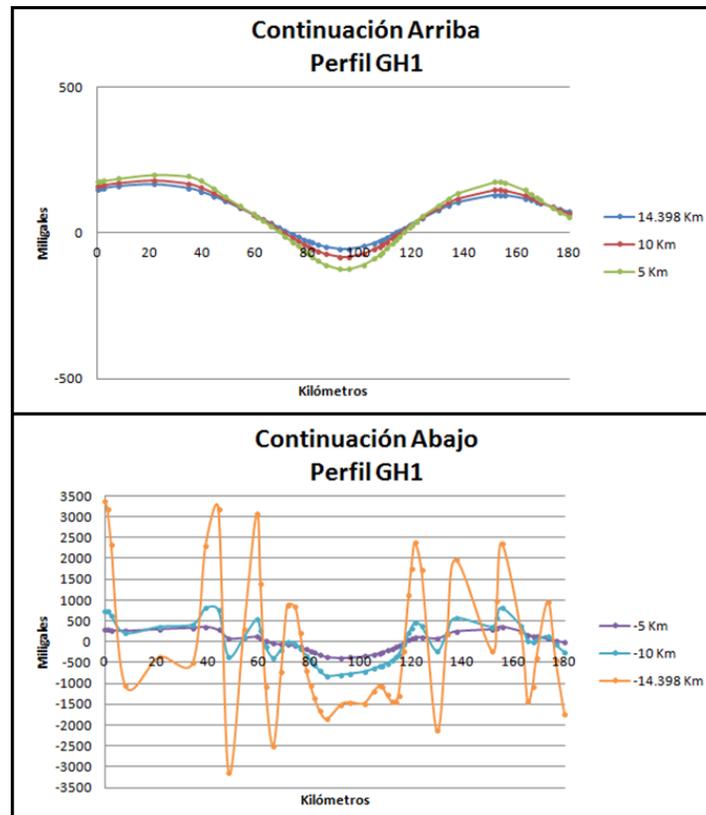
Distancia	dg	Continuación Arriba			Continuación Abajo		
		14.398 Km	10 Km	5 Km	-5 Km	-10 Km	-14.398 Km
5	100	90.99	21.954	24.798	92.254	91.956	152.135
8.5	120	102.782	36.656	45.363	184.901	400.565	1185.764
15.5	180	123.562	62.26	79.492	278.177	519.63	873.327
30.5	200	148.576	91.25	110.675	265.526	301.476	-151.917
37.5	220	150.534	94.951	118.213	319.715	559.951	1145.392
47	220	140.035	84.986	111.639	324.879	394.24	-567.815
52	200	127.349	70.322	94.875	340.084	753.201	2007.793
56.5	180	111.732	51.302	70.127	279.219	681.037	2273.792
60	120	97.389	33.421	45.294	149.528	35.111	-1086.364
63	100	84.16	17.093	23.535	74.949	-216.928	-2095.797
65.5	80	72.753	3.224	6.113	62.182	-37.498	-539.995
68	60	61.093	-10.83	-11.086	57.325	178.843	1171.953
70.5	40	49.487	-24.708	-27.971	27.085	135.664	1133.256
73	20	37.964	-38.385	-44.498	-24.186	-127.237	-396.932
75	0	28.927	-49.091	-57.321	-62.536	-328.984	-1600.102
78.5	-20	13.568	-67.298	-78.689	-84.313	-300.884	-1302.741
82.5	-40	-2.794	-86.904	-101.941	-82.662	-15.218	726.633
85	-60	-12.315	-98.667	-117.159	-116.078	-59.41	768.871
87.5	-80	-21.09	-109.789	-132.509	-173.298	-260.514	-54.064
90	-100	-28.584	-119.477	-146.428	-234.504	-496.74	-1063.468
91	-120	-31.301	-123.014	-151.563	-257.13	-580.371	-1396.018
93	-140	-36.259	-129.534	-161.182	-300.763	-738.073	-1985.443
99.5	-160	-44.864	-141.076	-178.26	-352.9	-820.892	-1921.219
107	-140	-39.817	-134.733	-169.162	-292.878	-535.783	-671.463
112	-120	-27.601	-119.315	-149.2	-286.83	-770.929	-2351.739
114.5	-100	-19.505	-109.006	-135.145	-239.423	-612.454	-1721.36
116.5	-80	-11.906	-99.336	-121.932	-190.128	-425.709	-916.053
118.5	-60	-3.535	-88.725	-107.585	-140.178	-246.61	-174.658
120	-40	2.963	-80.533	-96.699	-109.165	-161.656	89.998
122	-20	12.119	-69.035	-81.615	-72.499	-89.066	197.711
124	0	21.752	-56.978	-65.964	-39.512	-46.151	145.585
126	20	31.627	-44.645	-50.094	-10.291	-26.383	-2.271
129	40	46.602	-26.026	-26.564	20.128	-63.63	-433.875
131	60	56.627	-13.557	-10.808	40.482	-86.624	-699.315
133	80	66.417	-1.324	4.891	68.34	-64.414	-765.133
134.5	100	73.687	7.837	17.034	103.142	29.892	-494.441
137	120	85.387	22.677	37.106	172.653	256.434	259.523
141	180	102.057	43.925	65.929	266.5	552.509	1285.107
145.5	200	117.358	63.446	91.627	307.48	580.352	1350.047
152	220	130.096	80.285	115.702	338.762	376.532	-534.91
154	240	131.181	81.864	118.704	354.051	386.251	-754.065
157	260	130.738	81.544	120.266	423.529	804.627	1333.321
159.5	260	127.834	77.827	116.63	480.551	1238.181	3718.739
162.5	240	121.519	69.13	104.258	466.733	1317.853	4403.481
164.5	220	115.843	60.98	90.889	384.823	945.062	2659.31
166.5	200	108.971	51.114	74.535	279.379	462.19	424.364
168	140	103.26	42.988	61.279	200.755	125.554	-1051.256
170	120	95.335	31.852	43.717	122.206	-114.547	-1750.23
171.5	100	89.044	23.106	30.287	77.118	-178.501	-1556.558
173	80	82.531	14.15	16.856	39.456	-195.081	-1116.147
174.5	60	75.963	5.243	3.883	8.969	-185.763	-612.917
177	40	65.309	-8.845	-15.518	-27.878	-194.026	-328.825
179	20	57.049	-19.434	-29.038	-44.853	-223.276	-610.963
183	0	41.81	-38.526	-52.206	-61.3	-234.9	-1032.666

**Tabla 15.- Perfil GH2.** Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para las continuaciones arriba y las continuaciones abajo. Muestra la distancia entre cada punto de la línea de adquisición, el valor de la gravedad observada, los valores para cada una de las profundidades por default en el programa WinGLink (14.398 Km., 10 Km., 5 Km., -5Km., -10 Km., -14.398 Km.).

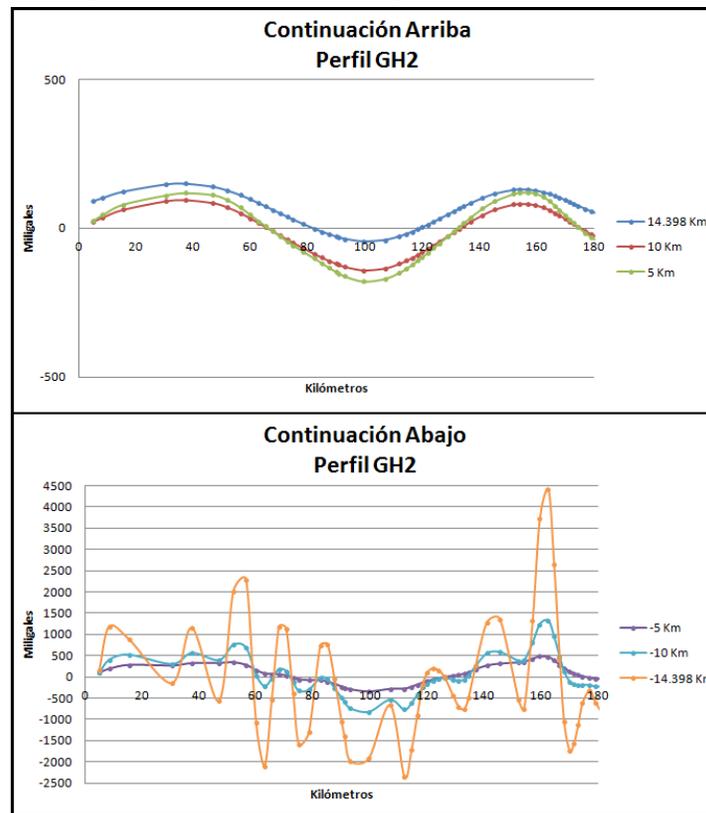
Distancia	dg	Continuación Arriba			Continuación Abajo		
		13.8 Km	10 Km	5 Km	5 Km	10 Km	13.8 Km
5.5	80	26.431	29.577	76.447	53.29	24.186	-716.463
20	100	40.742	45.534	94.702	84.937	107.391	-337.514
29.5	120	47.594	54.238	107.033	136.868	336.482	660.542
53	120	39.273	47.668	104.053	123.314	181.304	-128.101
63.5	100	17.648	23.507	77.84	135.197	458	1196.74
67	80	7.568	11.273	61.283	77.114	287.465	753.334
69	60	1.464	3.774	50.829	32.899	127.171	218.56
70.5	40	-3.28	-2.092	42.533	-4.927	-19.189	-299.112
73	20	-11.329	-12.026	28.618	-64.452	-240.259	-1064.444
78.5	0	-28.497	-32.63	2.334	-107.662	-201.749	-456.545
81	-20	-35.79	-41.171	-7.733	-107.312	-92.987	151.237
83.5	-40	-42.706	-49.201	-17.158	-121.347	-124.276	8.93
93.5	-60	-64.983	-75.025	-47.563	-176.262	-247.204	-330.653
97.5	-80	-71.131	-82.441	-57.044	-197.698	-288.859	-402.441
109	-100	-76.395	-90.203	-70.481	-246.733	-379.063	-504.004
115	-100	-70.022	-83.356	-64.354	-272.867	-559.385	-1215.058
119.5	-80	-60.471	-71.886	-49.935	-239.761	-506.48	-1264.466
123	-60	-50.318	-59.262	-32.961	-187.571	-357.933	-882.507
125	-40	-43.805	-51.08	-21.875	-154.039	-235.424	-364.064
127.5	-20	-34.854	-39.718	-6.27	-108.985	-82.345	282.544
129.5	0	-27.348	-30.103	7.099	-74.595	-2.398	524.185
132	20	-17.744	-17.727	24.336	-46.674	-78.227	-247.045
134	40	-9.995	-7.664	38.535	-25.104	-169.671	-1084.342
135.5	60	-4.358	-0.299	49.096	-3.864	-197.461	-1500.447
138.5	80	6.33	13.809	70.099	77.634	94.182	-422.507
140.5	100	12.858	22.511	83.501	149.917	455.575	1219.252
142.5	120	18.491	30.019	95.128	212.959	763.782	2596.662
145	180	24.267	37.628	106.526	245.651	782.883	2344.708
155	180	29.64	43.395	113.141	271.382	863.901	2486.733
158.5	120	24.829	36.044	100.202	227.079	853.561	2988.981
161	100	19.757	28.457	86.431	116.983	266.778	406.845
162.5	80	16.148	23.184	77.2	47.739	-102.408	-1230.404
165.5	60	8.414	12.248	59.597	-32.749	-410.6	-2371.503
168	40	1.563	2.908	46.097	-38.073	-213.034	-1073.353
172	20	-9.372	-11.723	25.74	-38.189	103.835	849.348
175	0	-17.07	-21.928	11.473	-68.193	49.184	658.258
178	-20	-23.713	-30.725	-0.905	-106.489	-108.089	-69.982

**Tabla 16.- Perfil GH3.** Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para las continuaciones arriba y las continuaciones abajo. Muestra la distancia entre cada punto de la línea de adquisición, el valor de la gravedad observada, los valores para cada una de las profundidades por default en el programa WinGLink (13.8 Km., 10 Km., 5 Km., -5Km., -10 Km., -13.8 Km.).

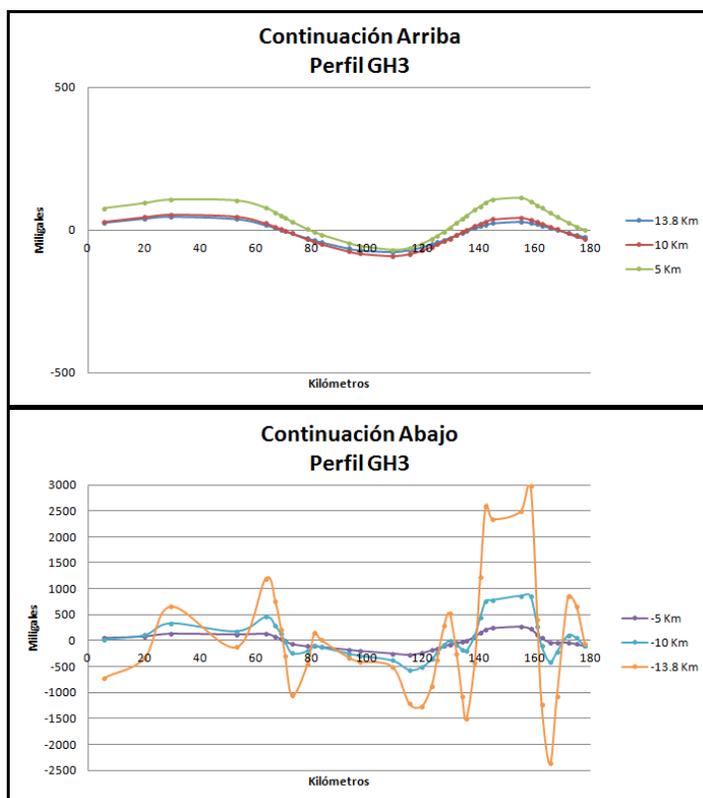
A continuación se muestran las imágenes de las gráficas obtenidas por los datos de las continuaciones arriba y las continuaciones abajo para el perfil GH1, el perfil GH2 y el perfil GH3 respectivamente (Figura 31, Figura 32 y Figura 33). Observar las escalas de las gráficas para la continuación arriba y la continuación abajo, como se muestra.



**Figura 31.- Perfil GH1.** Imagen de las gráficas de las continuaciones arriba y las continuaciones abajo aplicados a los valores de gravedad observada.



**Figura 32.- Perfil GH2.** Imagen de las gráficas de las continuaciones arriba y las continuaciones abajo aplicados a los valores de gravedad observada.



**Figura 33.- Perfil GH3.** Imagen de las gráficas de las continuaciones arriba y las continuaciones abajo aplicados a los valores de gravedad observada.

En la parte del manejo de los datos geofísicos, se realizaron las Transformadas de Fourier para los valores de la gravedad observada, para este cálculo se tuvo que hacer una interpolación de los datos de la gravedad observada a una distancia constante discretizada de 1 kilómetro entre cada uno de los puntos del perfil, esto con la ayuda de la siguiente fórmula para dicho cálculo:

$$\partial g_{int} = \partial g_1 + \frac{\partial g_2 - \partial g_1}{d_2 - d_1} * (d_{int} - d_1)$$

Se realizó la interpolación de los datos para discretizar los valores de la gravedad observada para tener una cantidad finita, esto para un mejor procesamiento de la curva y que sea equidistante para el cálculo de la Transformada de Fourier.

Teniendo la distancia constante de 1 kilómetro entre cada valor, así como del valor interpolado de cada uno de los valores de la gravedad observada para cada uno de los perfiles, se muestran a continuación en la siguientes tablas de datos (Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19).

Perfil GH1							
de: 90° 30' W, 20° 22' N							
a: 88° 45' W, 20° 22' N							
Gravedad Observada		Interpolación					
Distancia	dg	Distancia	dg				
1	180	1	190	56	114	119	0.00
2.5	200	2	200	57	110.00	120	16.67
8	200	3	200	58	106	121	33.33
21.5	200	4	200	59	102.00	122	42.67
34.5	220	5	200	60	91	123	52.00
39.5	220	6	200	61	80.00	124	57.67
44.5	220	7	200	62	70	125	63.33
48.5	180	8	200	63	60.00	126	66.67
54.5	120	9	200	64	53.33	127	70.00
59.5	100	10	200	65	46.67	128	73.33
61	80	11	200	66	40	129	76.67
63	60	12	200	67	33.33	130	80.83
66	40	13	200	68	26.67	131	85.00
69	20	14	200	69	20.00	132	90
71.5	0	15	200	70	12	133	95.00
74.5	-20	16	200	71	4.00	134	100.36
76.5	-40	17	200	72	-3	135	105.71
79	-60	18	200	73	-10.00	136	111.43
80.5	-80	19	200	74	-17.5	137	117.14
82	-100	20	200	75	-25.00	138	121.79
84	-120	21	200	76	-34.5	139	126.43
87	-140	22	201.15	77	-44.00	140	130.71
92.5	-160	23	202.31	78	-52	141	135.00
96	-180	24	203.85	79	-60.00	142	139.29
101.5	-180	25	205.38	80	-73.33	143	143.57
105.5	-160	26	206.92	81	-86.67	144	147.86
107.5	-140	27	208.46	82	-98.33	145	152.14
108.5	-120	28	210	83	-110.00	146	156.43
110.5	-100	29	211.54	84	-118.33	147	160.71
112.5	-80	30	213.08	85	-126.67	148	165
114	-60	31	214.62	86	-133.33	149	169.29
115	-40	32	216.15	87	-140.00	150	173.57
117	-20	33	217.69	88	-143.64	151	177.86
119	0	34	218.85	89	-147.27	152	186.43
120	20	35	220.00	90	-150.91	153	195.00
121.5	40	36	220	91	-154.55	154	205
124	60	37	220.00	92	-158.70	155	215.00
130	80	38	220.00	93	-162.86	156	217.5
134	100	39	220.00	94	-168.57	157	220.00
137.5	120	40	220.00	95	-174.29	158	220
151.5	180	41	220.00	96	-177.14	159	220.00
153.5	200	42	220	97	-180.00	160	220
155.5	220	43	220	98	-180	161	220.00
163	220	44	217.5	99	-180.00	162	220
165.5	200	45	215.00	100	-180	163	220.00
167.5	140	46	205	101	-180.00	164	212
169	120	47	195.00	102	-176.25	165	204.00
173.5	100	48	185	103	-172.50	166	179.5
176.5	80	49	175.00	104	-167.5	167	155.00
180	60	50	165	105	-162.50	168	137.5
		51	155.00	106	-153.75	169	120.00
		52	145	107	-145.00	170	115.56
		53	135.00	108	-130	171	111.11
		54	126.5	109	-115.00	172	106.67
		55	118.00	110	-105	173	102.22
				111	-95.00	174	96.11
				112	-84.17	175	90.00
				113	-73.33	176	83.57
				114	-56.67	177	77.14
				115	-40.00	178	71.43
				116	-30	179	65.71
				117	-20.00	180	60
				118	-10	181	54.29

**Tabla 17.- Perfil GH1.** Datos obtenidos de la interpolación de los valores de gravedad observada. La tabla muestra la distancia entre cada punto de la línea de adquisición y la interpolada. El valor de la gravedad observada y el valor de la gravedad observada interpolada.

Perfil GH2	
de: 90° 30' W, 20° 15' N	
a: 88° 45'W, 20° 15' N	

**Gravedad Observada**

Distancia	dg
5	100
8.5	120
15.5	180
30.5	200
37.5	220
47	220
52	200
56.5	180
60	120
63	100
65.5	80
68	60
70.5	40
73	20
75	0
78.5	-20
82.5	-40
85	-60
87.5	-80
90	-100
91	-120
93	-140
99.5	-160
107	-140
112	-120
114.5	-100
116.5	-80
118.5	-60
120	-40
122	-20
124	0
126	20
129	40
131	60
133	80
134.5	100
137	120
141	180
145.5	200
152	220
154	240
157	260
159.5	260
162.5	240
164.5	220
166.5	200
168	140
170	120
171.5	100
173	80
174.5	60
177	40
179	20
183	0

**Interpolación**

Distancia	dg
1	100
2	100
3	100
4	100
5	100
6	105.71
7	111.43
8	117.14
9	124.29
10	132.86
11	141.43
12	150
13	158.57
14	167.14
15	175.71
16	180.67
17	182
18	183.33
19	184.67
20	186
21	187.33
22	188.67
23	190
24	191.33
25	192.67
26	194
27	195.33
28	196.67
29	198
30	199.33
31	201.43
32	204.29
33	207.14
34	210
35	212.86
36	215.71
37	218.57
38	220
39	220
40	220
41	220
42	220
43	220
44	220
45	220
46	220
47	220
48	216
49	212
50	208
51	204
52	200
53	195.56
54	191.11
55	186.67
56	182.22
57	171.43

58	154.29
59	137.14
60	120
61	113.33
62	106.67
63	100
64	92
65	84
66	76
67	68
68	60
69	52
70	44
71	36
72	28
73	20
74	10
75	0
76	-5.71
77	-11.43
78	-17.14
79	-22.5
80	-27.5
81	-32.5
82	-37.5
83	-44
84	-52
85	-60
86	-68
87	-76
88	-84
89	-92
90	-106
91	-120
92	-130
93	-140
94	-143.08
95	-146.15
96	-149.23
97	-152.31
98	-155.38
99	-158.46
100	-157.23
101	-156.00
102	-153.33
103	-150.67
104	-148
105	-145.33
106	-142.67
107	-140.00
108	-136
109	-132.00
110	-128
111	-124.00
112	-118
113	-112.00
114	-103.5
115	-95.00
116	-85
117	-75.00
118	-64.17
119	-53.33
120	-41.67
121	-30.00

122	-20
123	-10.00
124	0
125	10.00
126	18.33
127	26.67
128	33.33
129	40.00
130	50
131	60.00
132	70
133	80.00
134	92
135	104.00
136	112
137	120.00
138	135
139	150.00
140	165
141	180.00
142	184.44
143	188.89
144	193.33
145	197.78
146	201.20
147	204.62
148	207.69
149	210.77
150	213.85
151	216.92
152	223.46
153	230.00
154	238.33
155	246.67
156	253.33
157	260.00
158	260
159	260.00
160	255
161	250.00
162	242.5
163	235.00
164	225
165	215.00
166	197.5
167	180.00
168	155
169	130.00
170	118.33
171	106.67
172	93.33
173	80.00
174	68
175	56.00
176	48
177	40.00
178	30
179	20.00
180	15
181	10.00
182	5
183	0.00

**Tabla 18.- Perfil GH2.** Datos obtenidos de la interpolación de los valores de gravedad observada. La tabla muestra la distancia entre cada punto de la línea de adquisición y la interpolada. El valor de la gravedad observada y el valor de la gravedad observada interpolada.

Perfil GH3		Gravedad Observada		Interpolación					
de: 90° 30' W, 20° 4' N		Distancia	dg	Distancia	dg				
a: 88° 45' W, 20° 4' N									
5.5	80	1	80	57	112.38	120	-77.14		
20	100	2	80	58	110.48	121	-71.43		
29.5	120	3	80	59	108.57	122	-65.71		
53	120	4	80	60	106.67	123	-60		
63.5	100	5	80	61	104.76	124	-50		
67	80	6	80.69	62	102.86	125	-40		
69	60	7	82.07	63	100.95	126	-32		
70.5	40	8	83.45	64	97.14	127	-24		
73	20	9	84.83	65	91.43	128	-15		
78.5	0	10	86.21	66	85.71	129	-5		
81	-20	11	87.59	67	80	130	4		
83.5	-40	12	88.97	68	70	131	12		
93.5	-60	13	90.34	69	60	132	20		
97.5	-80	14	91.72	70	46.67	133	30		
109	-100	15	93.10	71	36	134	40		
115	-100	16	94.48	72	28	135	53.33		
119.5	-80	17	95.86	73	20	136	63.33		
123	-60	18	97.24	74	16.36	137	70		
125	-40	19	98.62	75	12.73	138	76.67		
127.5	-20	20	100	76	9.09	139	85		
129.5	0	21	102.11	77	5.45	140	95		
132	20	22	104.21	78	1.82	141	105		
134	40	23	106.32	79	-4	142	115		
135.5	60	24	108.42	80	-12	143	132		
138.5	80	25	110.53	81	-20	144	156		
140.5	100	26	112.63	82	-28	145	180		
142.5	120	27	114.74	83	-36	146	180		
145	180	28	116.84	84	-41	147	180		
155	180	29	118.95	85	-43	148	180		
158.5	120	30	120	86	-45	149	180		
161	100	31	120	87	-47	150	180		
162.5	80	32	120	88	-49	151	180		
165.5	60	33	120	89	-51	152	180		
168	40	34	120	90	-53	153	180		
172	20	35	120	91	-55	154	180		
175	0	36	120	92	-57	155	180		
178	-20	37	120	93	-59	156	162.86		
181	-40	38	120	94	-62.5	157	145.71		
		39	120	95	-67.5	158	128.57		
		40	120	96	-72.5	159	116		
		41	120	97	-77.5	160	108		
		42	120	98	-80.87	161	100		
		43	120	99	-82.61	162	86.67		
		44	120	100	-84.35	163	76.67		
		45	120	101	-86.09	164	70		
		46	120	102	-87.83	165	63.33		
		47	120	103	-89.57	166	56		
		48	120	104	-91.30	167	48		
		49	120	105	-93.04	168	40		
		50	120	106	-94.78	169	35		
		51	120	107	-96.52	170	30		
		52	120	108	-98.26	171	25		
		53	120	109	-100	172	20		
		54	118.10	110	-100	173	13.33		
		55	116.19	111	-100	174	6.67		
		56	114.29	112	-100	175	0		
				113	-100	176	-6.67		
				114	-100	177	-13.33		
				115	-100	178	-20		
				116	-95.56	179	-26.67		
				117	-91.11	180	-33.33		
				118	-86.67	181	-40		
				119	-82.22				

**Tabla 19.- Perfil GH3.** Datos obtenidos de la interpolación de los valores de gravedad observada. La tabla muestra la distancia entre cada punto de la línea de adquisición y la interpolada. El valor de la gravedad observada y el valor de la gravedad observada interpolada.

Se muestran las imágenes de las gráficas de los perfiles reales y de las gráficas obtenidas por el cálculo de las interpolaciones para cada una de las líneas de adquisición. Para el perfil GH1, perfil GH2 y el perfil GH3 respectivamente (Figura 34, Figura 35 y Figura 36). Las gráficas se dividen en Perfil GH1 Real y Perfil GH1 Interpolado.

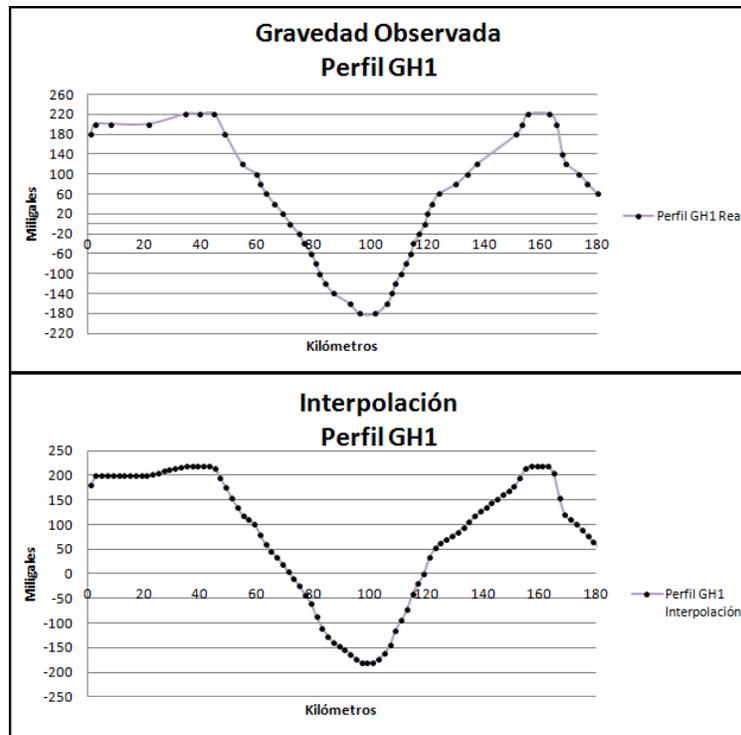


Figura 34.- Perfil GH1. Imagen de las gráficas del Perfil GH1 y del Perfil GH1 Interpolado.

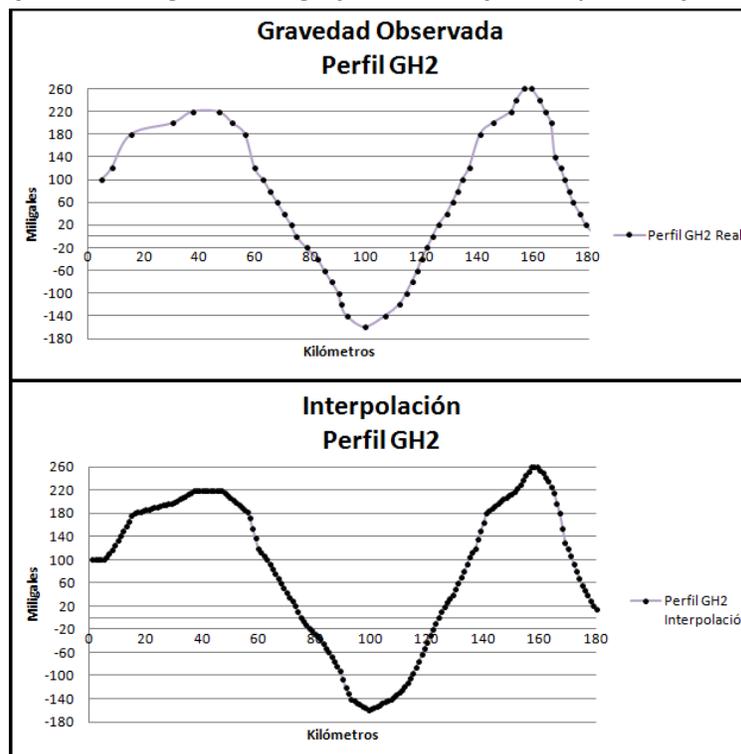
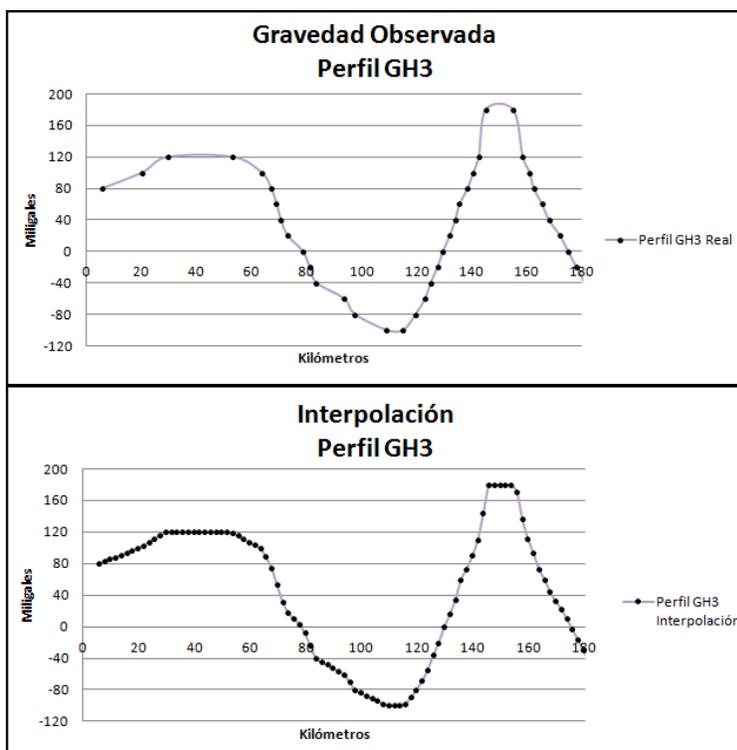


Figura 35.- Perfil GH2. Imagen de las gráficas del Perfil GH2 y del Perfil GH2 Interpolado.



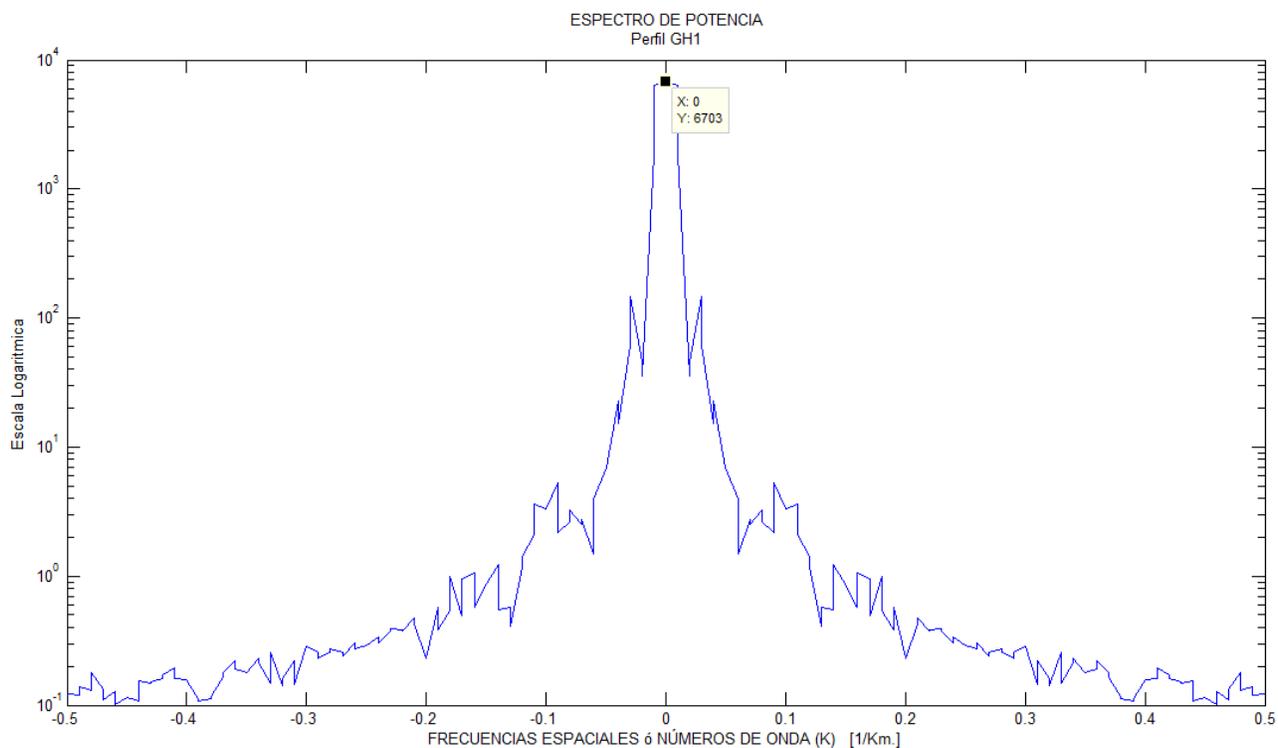
**Figura 36.- Perfil GH3.** Imagen de las gráficas del Perfil GH3 y del Perfil GH3 Interpolado.

Se realizó el cálculo de la Transformada de Fourier para cada uno de los perfiles, realizando una serie de secuencias en el compilador de Matlab, esta serie de secuencias nos darán la Transformada de Fourier calculada para cada perfil, calcularemos y graficaremos su Espectro de Potencia en escala logarítmica natural, en función de las Frecuencias Espaciales ó Número de Onda, esto para realizar la interpretación.

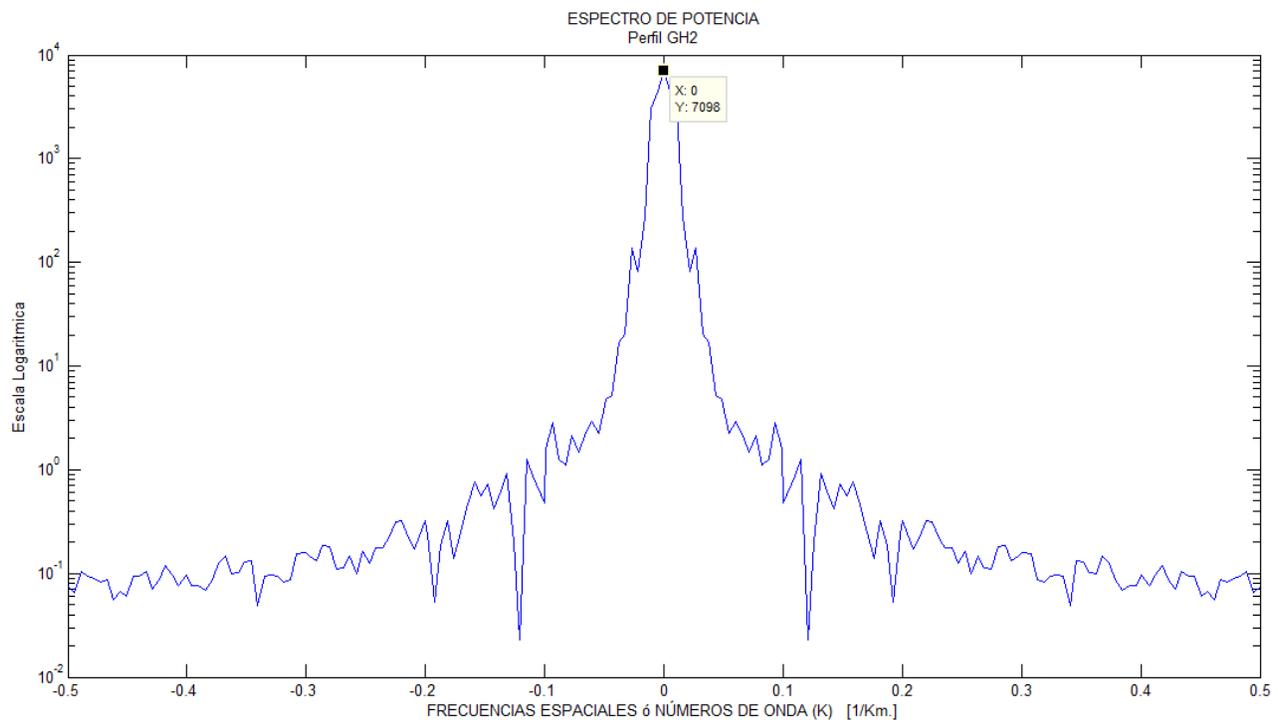
Para esta parte del procesamiento de los valores de las 3 líneas de adquisición, se necesitó ingresar al compilador de Matlab los valores de la gravedad observada, los valores de la gravedad observada interpolada, así como una tabla de los valores de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda antes calculadas que contienen sus correspondientes Frecuencias Espaciales, así como de sus frecuencias de Nyquist.

Ingresados estos datos en el compilador de Matlab aplicamos la Transformada de Fourier a la tabla de los valores de gravedad observada interpolada, para obtener dicha Transformada de Fourier a la cual aplicaremos su segunda potencia para así obtener su Contenido de Potencia. Graficamos en logaritmo natural el Contenido de Potencia obtenido de la Transformada de Fourier en función de la tabla antes obtenida de los valores de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda.

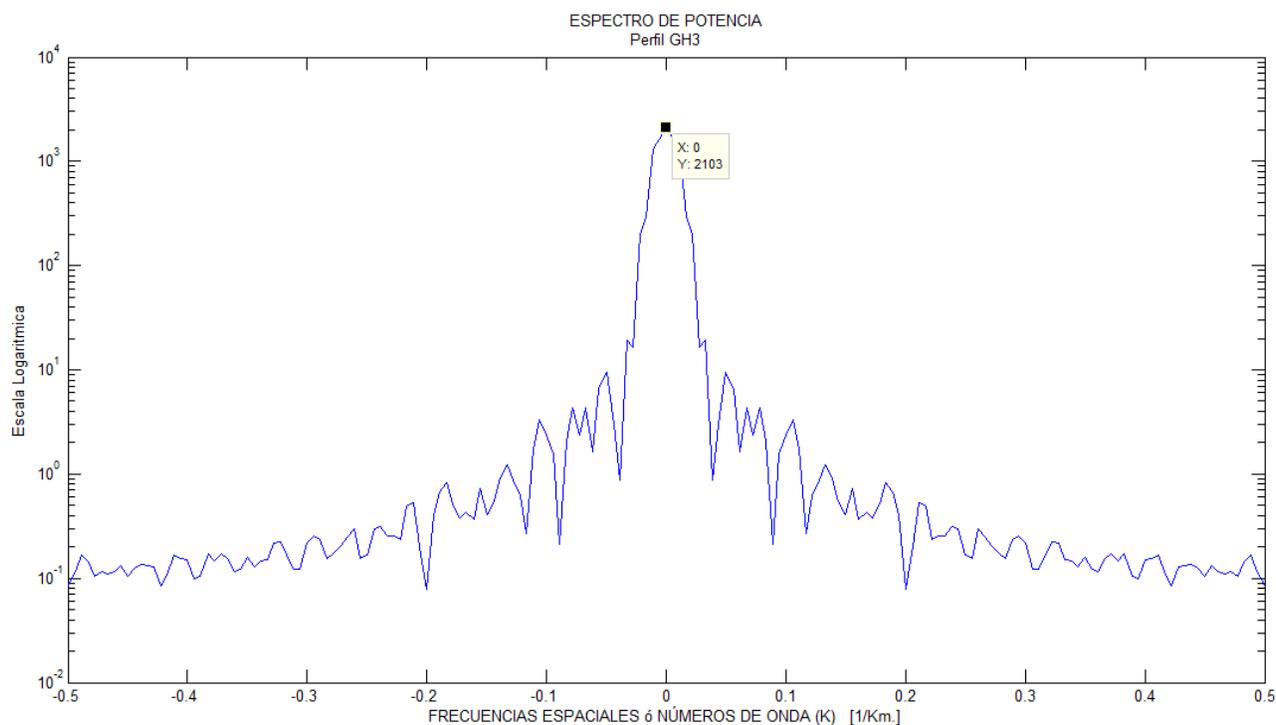
Obtendremos así la gráfica del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda, para cada uno de los perfiles, los cuales se muestran a continuación (Figura 37, Figura 38 y Figura 39).



**Figura 37.- Perfil GH1.** Gráfica del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda, con un espaciamento de 1 kilómetro.



**Figura 38.- Perfil GH2.** Gráfica del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda, con un espaciamento de 1 kilómetro.



**Figura 39.- Perfil GH3.** Gráfica del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda, con un espaciamento de 1 kilómetro.

El comportamiento de las señales periódicas para el cálculo en el dominio de Fourier nos dice que las anomalías someras tienen una respuesta de frecuencia alta y de baja pendiente, mientras que para las anomalías profundas la respuesta es presentada en frecuencias bajas y de pendiente alta.

De esta parte también nos dice que las bajas frecuencias representan las anomalías más profundas y que las frecuencias altas representan las anomalías más someras.

Presentamos la pequeña serie de pasos que se realizó en el compilador de Matlab para calcular los Espectros de Potencia en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda (Figura 40).

```

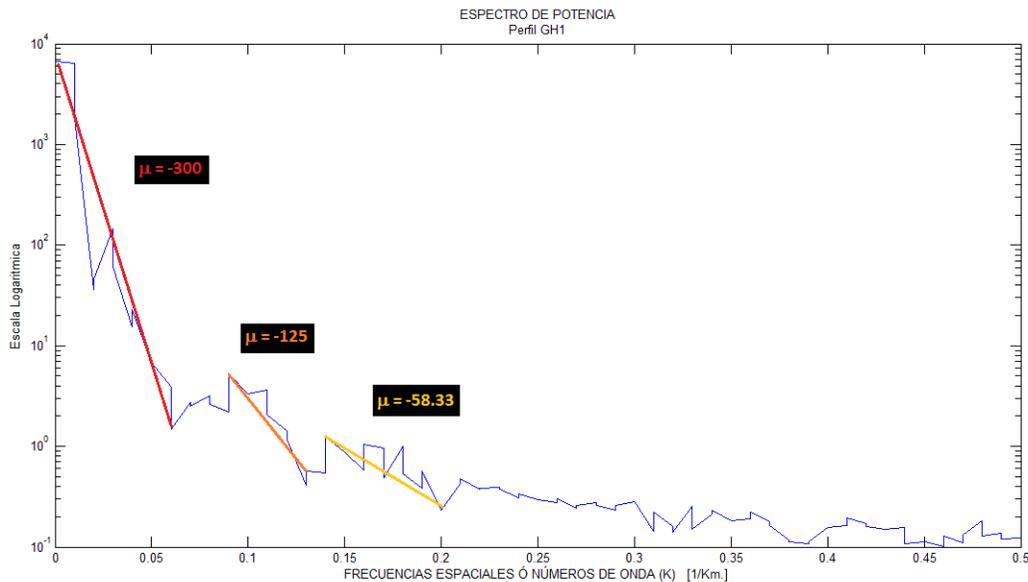
1 - clear
2 - clear all
3 - clc
4 - %Programa para calcular el espectro de Potencia
5 - %a partir de los valores de gravedad observada.
6
7 - %Cargar los valor de la gravedad observada.
8 - load GH1_y.txt;
9 - %Obtenemos el vector de los valores de la gravedad observada.
10 - x=[GH1_y];
11 - %Graficamos el vector de los valores de la gravedad observada.
12 - plot(x);
13 - %Aplicamos la Transformada de Fourier
14 - y=abs(fft(x));
15 - %Dividimos nuestra Transformada de Fourier entre el número de muestras
16 - %y graficamos
17 - y1=(y./180);
18 - plot(y1);
19 - %Ordenamos nuestra Transformada de Fourier y graficamos.
20 - y2=(fftshift(y1));
21 - plot(y2);
22 - %Calculamos el Espectro de Potencia y graficamos.
23 - P=(y2.^2);
24 - plot(P);
25 - %Obtenemos el numero de onda.
26 - dx=1;
27 - X1=[0:1:90];
28 - X2=[-90:1:0];
29 - k0=(1/180);
30 - kN=(1/2*dx);
31 - %Calculado en un nuevo archivo, se carga y se le da la variable.
32 - load GH1_K.txt;
33 - K=[GH1_K];
34 - %Graficamos el Espectro de Potencia vs Número de Onda
35 - plot(K,P);
36 - %Por último se modifica la gráfica.

```

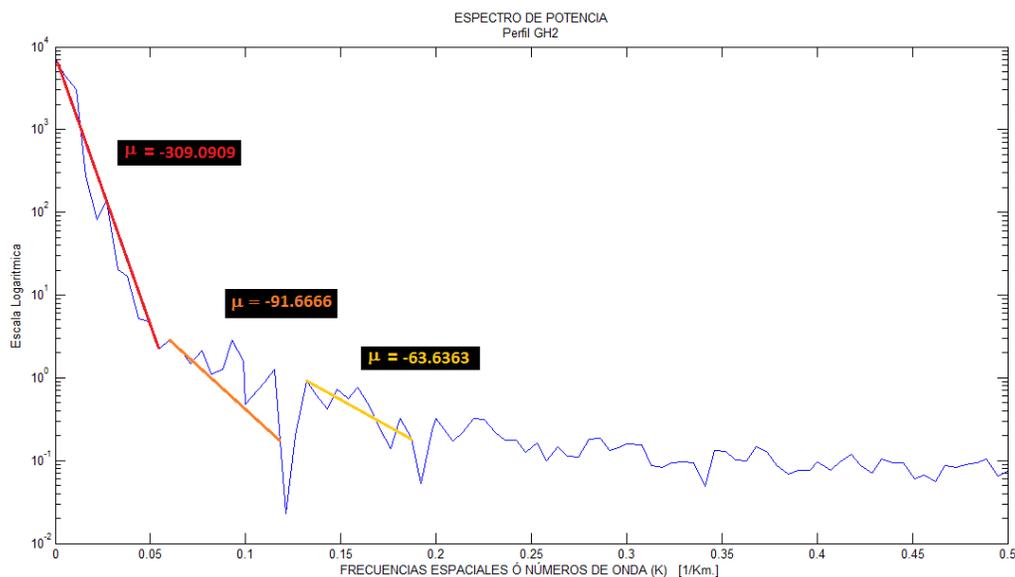
**Figura 40.-** Programa para calcular el Espectro de Potencia a partir de los valores de gravedad observada para el perfil GH1. Misma estructura para calcular el perfil GH2 y el perfil GH3 con su correspondiente gravedad observada y gravedad interpolada.

Para esta parte del procesamiento, es necesario tener solo la parte positiva de la gráfica del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda para cada uno de los perfiles, como se muestra en las Figuras 41, Figura 42 y Figura 43.

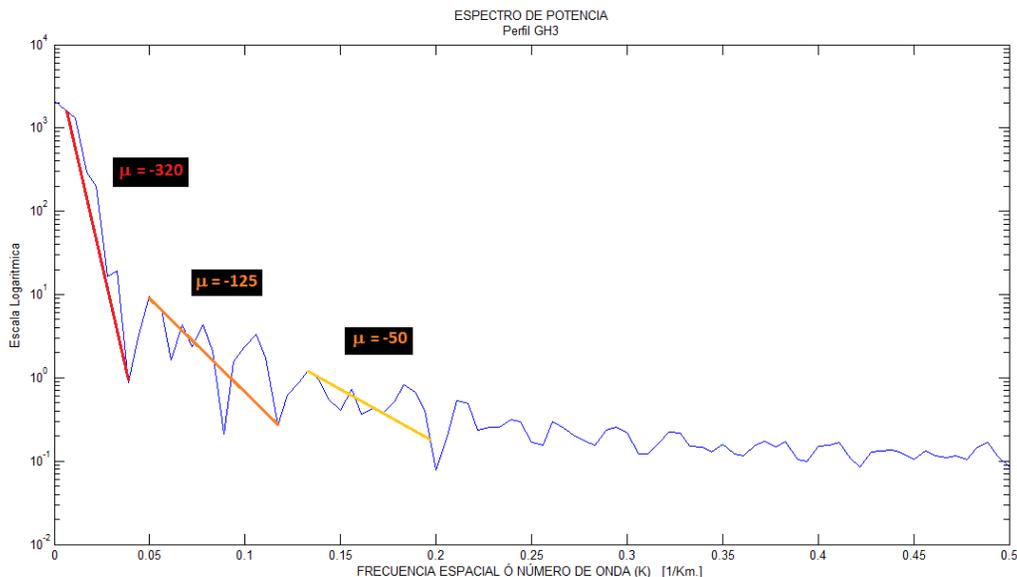
El siguiente paso a realizar es el de calcular las pendientes de la parte positiva del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda más importantes de la gráfica, ya que con esto nos ayudará a calcular la profundidad de las fuentes que provocan la anomalía en el subsuelo.



**Figura 41.- Perfil GH1.** Gráfica de la parte positiva del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda y de sus correspondientes pendientes.



**Figura 42.- Perfil GH2.** Gráfica de la parte positiva del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda y de sus correspondientes pendientes.



**Figura 43.- Perfil GH3.** Gráfica de la parte positiva del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda y de sus correspondientes pendientes.

El primer paso es descomponer en tres tramos bien diferenciados definidos por tres rectas de ajuste para calcular las tres pendientes de cada uno de los tres perfiles, modificar la escala logarítmica a una escala normal, posteriormente aplicar el método de mínimos cuadrados para obtener el valor de la pendiente de las 3 rectas para cada perfil.

A continuación la Tabla 20, nos muestra las pendientes de cada una de las 3 rectas para cada uno de los perfiles.

Perfil GH1		Perfil GH2		Perfil GH3	
de: 90° 30' W, 20° 22' N		de: 90° 30' W, 20° 15' N		de: 90° 30' W, 20° 4' N	
a: 88° 45'W, 20° 22' N		a: 88° 45'W, 20° 15' N		a: 88° 45'W, 20° 4' N	

Línea Roja		Línea Roja		Línea Roja	
X	Y	X	Y	X	Y
0	19	0	19	0	16
0.06	1	0.055	2	0.05	0

Línea Naranja		Línea Naranja		Línea Naranja	
X	Y	X	Y	X	Y
0.09	4	0.06	2	0.05	5
0.13	-1	0.12	-3.5	0.09	0

Línea Amarilla		Línea Amarilla		Línea Amarilla	
X	Y	X	Y	X	Y
0.14	0.5	0.135	0	0.15	-1
0.2	-3	0.19	-3.5	0.19	-3

Pendiente	Perfiles		
	GH1	GH2	GH3
Línea Roja	-300	-309.1	-320
Línea Naranja	-125	-91.66	-125
Línea Amarilla	-58.3	-63.63	-50

**Tabla 20.-** Pendientes calculadas a partir de las gráficas obtenidas del Espectro de Potencia. Estos valores son obtenidos al modificar la escala para el Perfil GH1, Perfil GH2 y Perfil GH3.

Para calcular las profundidades aproximadas a partir de las pendientes obtenidas, (Spector y Grant, 1970) reportaron la relación que existe entre la forma del espectro de potencia obtenida de los datos gravimétricos y la profundidad aproximada de las fuentes que provocan dicha anomalía.

El método consiste en que el logaritmo del Espectro de Potencia está constituido por segmentos de líneas rectas definido por un intervalo de frecuencias que corresponden a una fuente que origina una anomalía, esto es, que sus pendientes están relacionadas directamente con la profundidad de las fuentes gravimétricas, por medio de la siguiente relación:

$$h = \frac{-s}{4\pi}$$

Donde:

h = la profundidad de la fuente gravimétrica.

s = pendiente del logaritmo del espectro de potencia.

Los datos más altos al número de Nyquist sufrirán lo que es conocido como aliasing (frecuencia que resalta el proceso de muestreo).

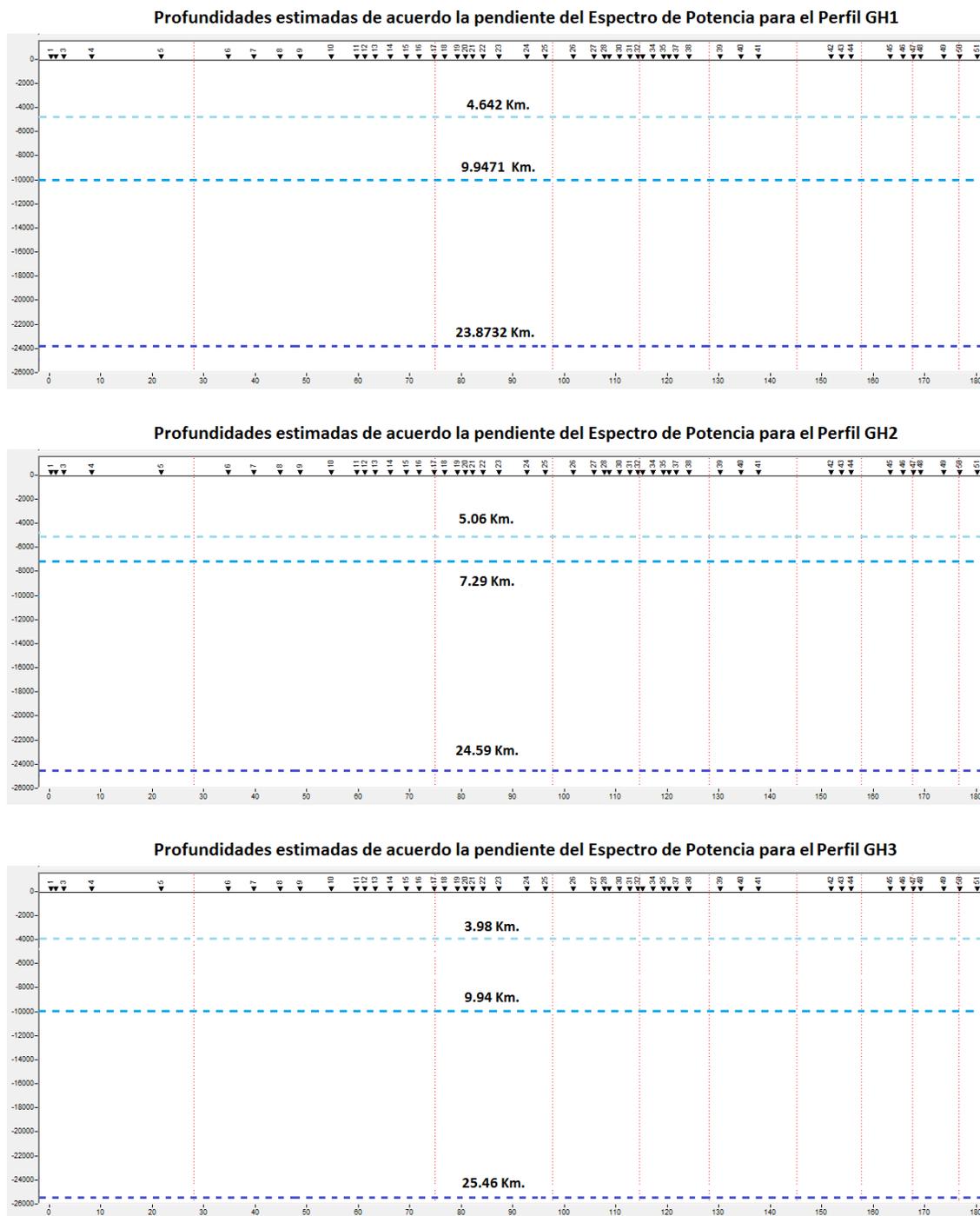
Esto nos quiere decir que, entre mayor sea la pendiente mayor será la profundidad de la fuente. Una fuente somera da lugar a una anomalía residual con menor longitud de onda, y un ruido representado por las frecuencias más altas. A partir de los datos obtenidos de los espectros de potencia de cada perfil, se definieron tres tramos lineales en para cada uno de los perfiles.

Para el perfil GH1 del mapa de anomalías de Bouguer, la fuente más profunda se encuentra a 23.87 kilómetros, correspondiendo a un intervalo de frecuencias de 0 – 0.06 [1/km] , para la fuente intermedia se encuentra a una profundidad aproximada de 9.95 kilómetros, correspondiendo a un intervalo de frecuencias de 0.09 – 0.13 [1/km] y para la fuente más somera, se encuentra a una profundidad estimada de 4.64 kilómetros, correspondiendo a un intervalo de frecuencias de 0.14 – 0.2 [1/km] . El último tramo de la señal, corresponde al ruido.

Para el perfil GH2 del mapa de anomalías de Bouguer, la fuente más profunda se encuentra a 24.59 kilómetros, correspondiendo a un intervalo de frecuencias de 0 – 0.055 [1/km] , para la fuente intermedia se encuentra a una profundidad aproximada de 7.29 kilómetros, correspondiendo a un intervalo de frecuencias de 0.06 – 0.12 [1/km] y para la fuente más somera, se encuentra a una profundidad estimada de 5.06 kilómetros, correspondiendo a un intervalo de frecuencias de 0.135 – 0.19 [1/km] . El último tramo de la señal, corresponde al ruido.

Para el perfil GH3 del mapa de anomalías de Bouguer, la fuente más profunda se encuentra a 25.46 kilómetros, correspondiendo a un intervalo de frecuencias de 0 – 0.05 [1/km] , para la fuente intermedia se encuentra a una profundidad aproximada de 9.94 kilómetros, correspondiendo a un intervalo de frecuencias de 0.06 – 0.12 [1/km] y para la fuente más somera, se encuentra a una profundidad estimada de 3.98 kilómetros, correspondiendo a un intervalo de frecuencias de 0.135 – 0.19 [1/km] . El último tramo de la señal, corresponde al ruido.

Se muestra la imagen de las profundidades aproximadas de las fuentes obtenidas del cálculo de (Spector y Grant, 1970); (El-Khadragy, Saad et al. 2010) para los tres perfiles, obtenidas de las pendientes del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda (Figura 44).



**Figura 44.- Imagen de los perfiles. Profundidades aproximadas de las fuentes principales obtenidas del cálculo de (Spector y Grant, 1970).**

Los cálculos como la continuación arriba, la continuación abajo, la primera derivada vertical, la segunda derivada vertical, el gradiente horizontal, la Transformada de Fourier, el Contenido de Potencia, así como del cálculo de las pendientes para cada perfil a partir del Contenido de Potencia, nos ayudarán a identificar y caracterizar las anomalías en la zona de estudio, así como de tener un mejor control de las fuentes que provocan la anomalía en el subsuelo.

Todos estos métodos son cualitativos, para hacerlos cuantitativos usaremos el método de Talwani.

Para la construcción de los modelos Gravimétricos de la zona sur del cráter de Chicxulub, debemos tomar en cuenta las tablas de densidades como los cálculos de profundidades, así como de las densidades promedio de la corteza terrestre y otras teorías antes mencionadas como la evolución de la plataforma carbonatada en Yucatán.

Realizaremos el modelo gravimétrico, haciendo un amarre en los datos gravimétricos, el cual se puede hacer por medio de la geometría del lugar y sus propiedades físicas, como solo se tiene un estudio que es el de gravimetría, se debe suponer alguna de estas propiedades, en este caso el de la densidad o el de la geometría del lugar.

Estos modelos fueron realizados con diferentes cuerpos que representan dicha anomalía obtenida de los valores de gravedad en campo, estos modelos representativos y cualitativos tienen densidades del orden mayor de  $1.9 \text{ g/cm}^3$  que es el límite inferior de las rocas que están fracturadas y densidades menores a  $2.7 \text{ g/cm}^3$  que es el límite superior para el manto superior. Las densidades tomadas para estos modelos son un promedio del modelado.

La aproximación obtenida en los modelos, es comparada con los datos de la gravedad obtenida por la corrección de Bouguer simple llamados datos de gravedad observada, esta comparación tiene mínimos desajustes o que no corresponden, esto para la zona de los bloques laterales, donde no es posible ajustar del todo bien los altos gravimétricos, debido a la falta de otras geometrías y densidades para este lugar.

Con estos modelos obtenidos podemos usar criterios adecuados para la correcta interpretación de lo obtenido con lo que queremos demostrar.

## Interpretación

El modelado de las anomalías gravimétricas no tiene una solución única. Esto se puede visualizar intuitivamente con un modelo imaginario consistente en un estrato somero cuya densidad varía espacialmente en 'x' y 'y', de tal manera que produzca la anomalía observada. Esto, desde luego, usan algunos artificios matemáticos, para ilustrar la magnitud del problema. Por ello, un buen modelado gravimétrico dependerá del conocimiento geológico que se tenga de la zona de estudio.

El objetivo de la interpretación gravimétrica es separar los efectos de las masas someras y profundas, la definición de los efectos gravimétricos de las anomalías sedimentarias, determinando la probable profundidad y las dimensiones de las estructuras.

Los siguientes modelos representan solo al perfil GH1, ya que visualmente podemos comparar los 3 perfiles de anomalías gravimétricas de Bouguer y observar que tienen una gran similitud, no suponiendo que son los mismos, pero sí que tienen una geometría parecida.

El modelo Chicxulub 01 (Figura 45), fue realizado con diferentes cuerpos que representen dicha anomalía obtenida de los valores de gravedad en campo, este modelo representativo y cualitativo tiene densidades promedio que van desde  $1.9 \text{ g/cm}^3$  a  $2.64 \text{ g/cm}^3$ . Se realizó para una profundidad aproximada de  $24.665 \pm 0.795$  kilómetros de profundidad.

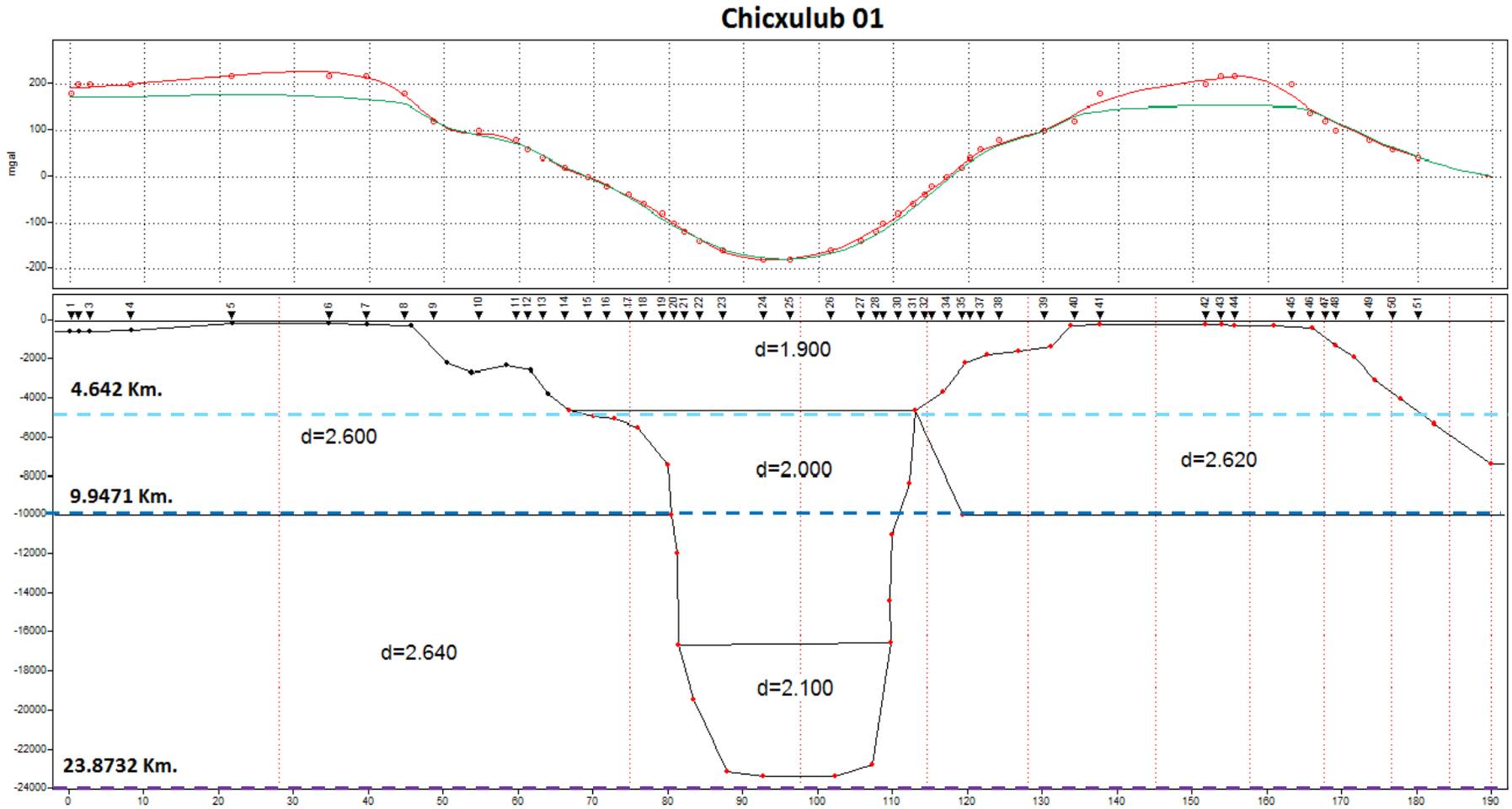
El cuerpo más somero tiene una densidad del orden de  $1.9 \text{ g/cm}^3$ , la cual geológicamente se podría representar como una cuenca pre-impacto, cubierta por una capa de sedimento de roca caliza, con una profundidad aproximada de 4.64 kilómetros en la zona centro que es la más profunda y de unas cuantas decenas de metros en las zonas laterales del modelo.

Los cuerpos laterales tienen una densidad del orden de  $2.6 \text{ g/cm}^3$  para el lado izquierdo del modelo y de  $2.62 \text{ g/cm}^3$  para el lado derecho del modelo, con una profundidad aproximada que va desde unas cuantas decenas de metros hasta unos 9.95 kilómetros de profundidad, esta zona quiere representar dos bloques de diferente roca que tuvieron un movimiento pre-impacto y que se posicionaron en ese lugar.

Los cuerpos centrales del modelo son representados como una zona de baja densidad del orden de  $2.0 \text{ g/cm}^3$  a  $2.1 \text{ g/cm}^3$ , con una profundidad de aproximadamente 4.64 kilómetros hasta unos 23.87 kilómetros de profundidad, esta zona es representada por una zona de roca caliza dolomitizada, la cual contiene fracturas y fallas, lo que permite la infiltración de agua y sedimentos, los cuales provocan que esta zona tenga una densidad tan baja.

El cuerpo más profundo para este modelo tiene una densidad de  $2.64 \text{ g/cm}^3$ , con una profundidad aproximada que va de 9.47 kilómetros hasta los 23.87 kilómetros de profundidad, esta zona representa otro gran sector de roca de diferente composición, la cual se encuentra a gran profundidad, lo que hace que la densidad sea más alta. Esta zona contiene una falla en el contacto con las capas centrales e intermedia derecha, la cual atraviesa el perfil en el kilómetro 105 y se representa en superficie como un borde, este borde es visualizado desde imágenes satelitales.

---



**Figura 45.-** Modelos representativo de la zona sur del cráter de Chicxulub. Se tienen 4 zonas importantes. a).- Los cuerpos someros. b).- Los cuerpos laterales. c).- Los cuerpos centrales. d).- Los cuerpos profundos.

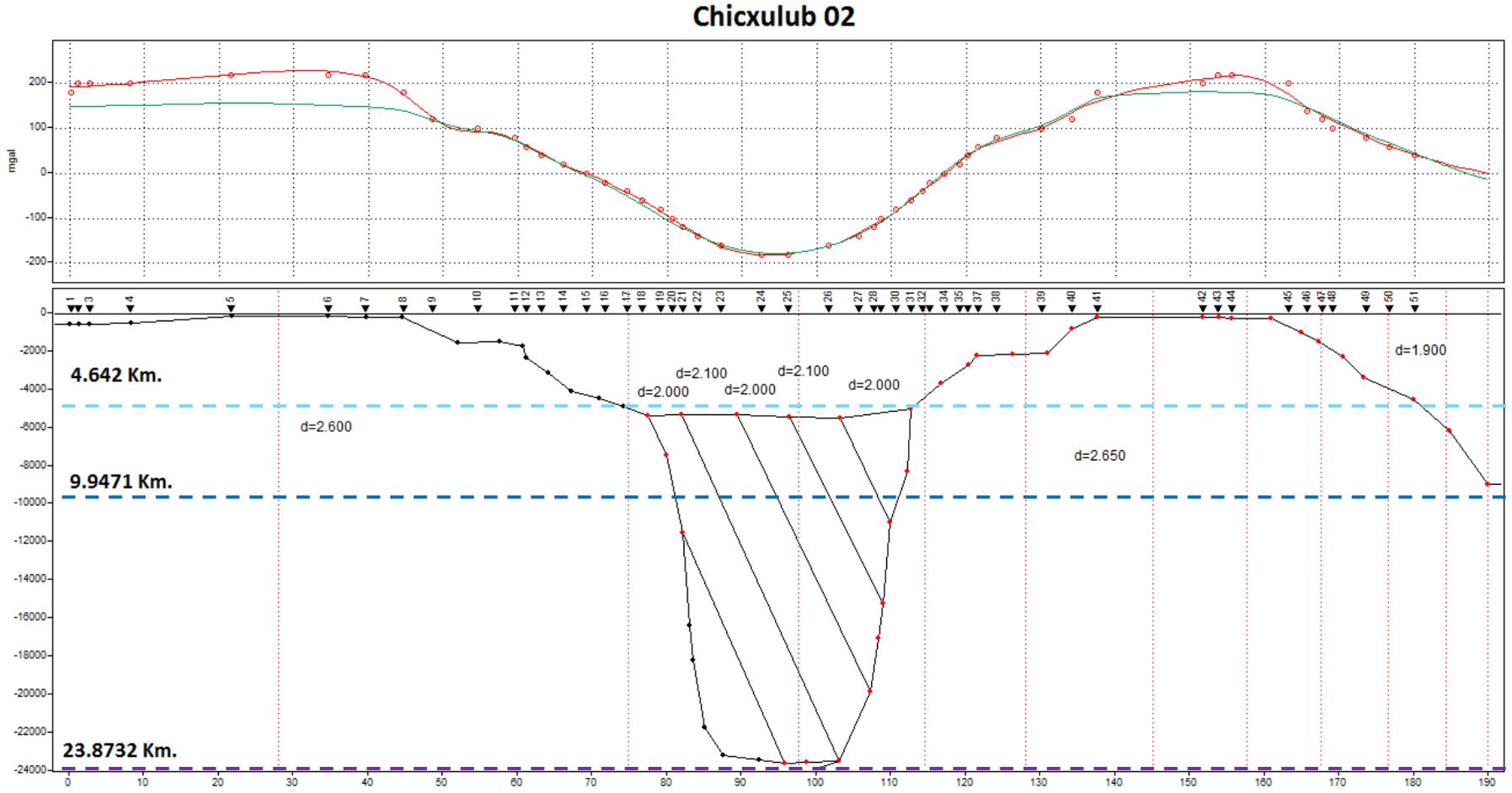
El modelo Chicxulub 02 (Figura 46), fue realizado con diferentes cuerpos estructurales, que determinan la complejidad de la anomalía obtenida por los valores de gravedad observada. Estos cuerpos estructurales que representan el modelo cuantitativo tienen una densidad promedio que van desde  $1.9 \text{ g/cm}^3$  a  $2.65 \text{ g/cm}^3$ . Se ha realizado el modelo para una profundidad aproximada del orden de los  $24.665 \pm 0.795$  kilómetros de profundidad.

El cuerpo más superficial tiene una densidad promedio de  $1.9 \text{ g/cm}^3$ , la cual representa geológicamente una cuenca pre-existente, la cual fue cubierta por una capa de sedimento de roca caliza, esta capa superficial tiene una profundidad de aproximadamente 4.64 kilómetros en la zona central que es muy profunda y de unas cuantas decenas de metros en las zonas laterales del modelo.

Los cuerpos laterales tienen una densidad del orden de  $2.6 \text{ g/cm}^3$  para el lado izquierdo del modelo y de  $2.65 \text{ g/cm}^3$  para el lado derecho del modelo, con una profundidad aproximada que va desde unas cuantas decenas de metros hasta los 23.87 kilómetros de profundidad en ambos bloques, esta zona representa dos bloques de diferente roca que tuvieron un movimiento pre-impacto y que se posicionaron en ese lugar. La unión entre estos dos cuerpos cuenta con una falla, la falla está asociada al movimiento de formación, que se encuentra localizada a unos 105 kilómetros dentro del perfil GH1.

Los cuerpos centrales del modelo son representados como una zona de baja densidad del orden de  $2.0 \text{ g/cm}^3$  a  $2.1 \text{ g/cm}^3$ , con una profundidad de aproximadamente 4.64 kilómetros hasta unos 23.87 kilómetros de profundidad, esta zona es representada por una zona de fracturamientos diagonales, su composición es de roca caliza dolomitizada, lo que permite la infiltración de agua y sedimentos, los cuales provocan que esta zona tenga una densidad muy baja.

En la parte derecha más distal del modelo, se observa que la línea de adquisición vuelve a tener una pendiente o un decaimiento, esto nos habla a que dicha estructura continua, pero no se puede resolver ni interpretar ya que sale del margen de estudio (Figura 46).



**Figura 46.-** Modelos representativo de la zona sur del cráter de Chicxulub. Se tienen 3 zonas importantes. a).- Los cuerpos someros. b).- Los cuerpos laterales. c).- Los cuerpos centrales.

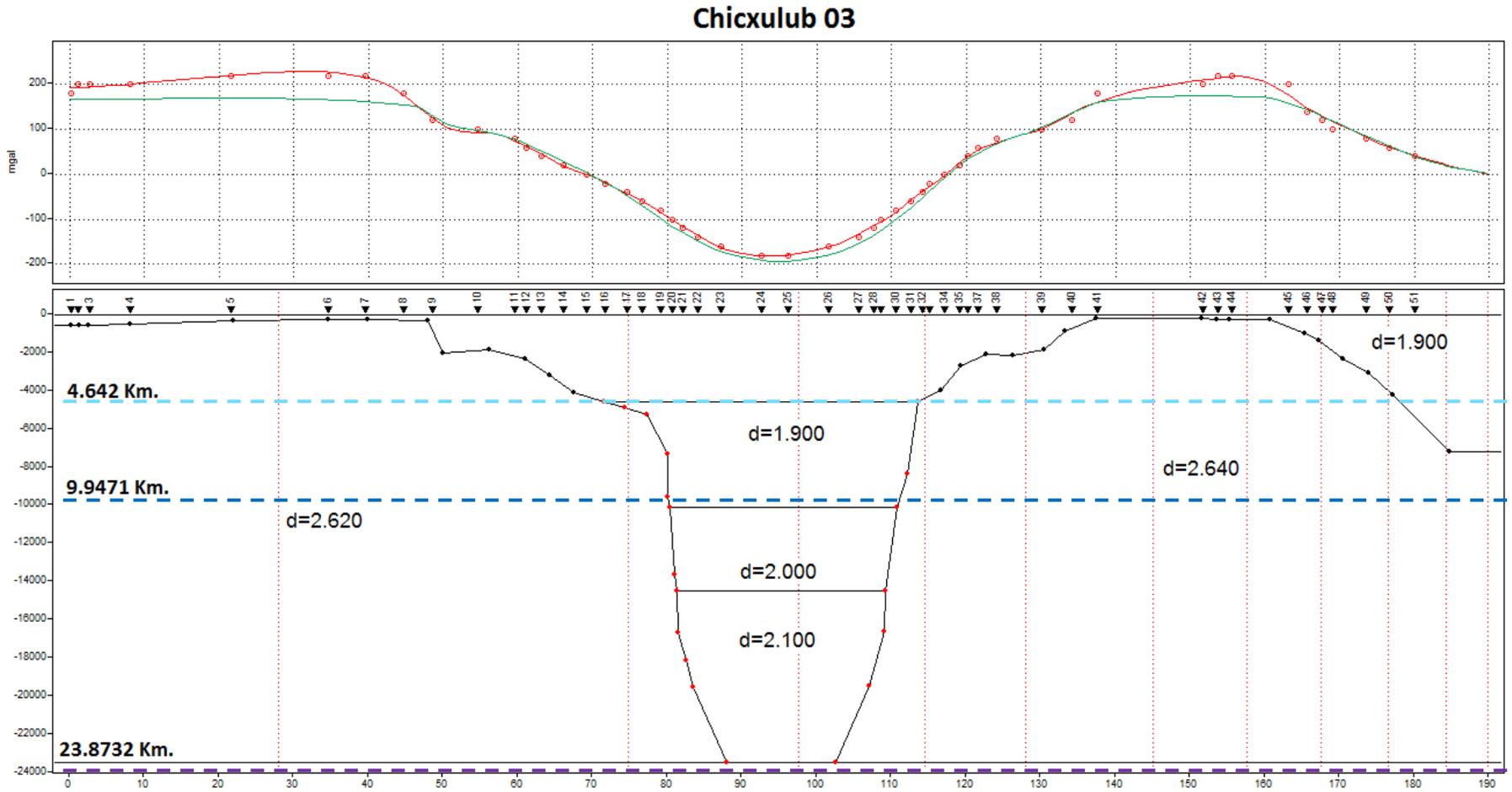
El modelo Chicxulub 03 (Figura 47), fue realizado con diferentes cuerpos estructurales, que determinan la complejidad de la anomalía obtenida por los valores de gravedad observada. Estos cuerpos estructurales que representan el modelo cuantitativo tienen una densidad promedio que van desde  $1.9 \text{ g/cm}^3$  a  $2.64 \text{ g/cm}^3$ . Se ha realizado el modelo para una profundidad aproximada del orden de los  $24.665 \pm 0.795$  kilómetros de profundidad.

El cuerpo más superficial tiene una densidad promedio de  $1.9 \text{ g/cm}^3$ , la cual representa geológicamente una cuenca pre-existente, la cual fue cubierta por una capa de sedimento de roca caliza, esta capa superficial tiene una profundidad de aproximadamente 4.64 kilómetros en la zona central que es muy profunda y de unas cuantas decenas de metros en las zonas laterales del modelo.

Los cuerpos laterales tienen una densidad del orden de  $2.62 \text{ g/cm}^3$  para el lado izquierdo del modelo y de  $2.64 \text{ g/cm}^3$  para el lado derecho del modelo, con una profundidad aproximada que va desde unas cuantas decenas de metros hasta los 23.87 kilómetros de profundidad en ambos bloques, esta zona representa dos bloques de diferente roca que tuvieron un movimiento pre-impacto y que se posicionaron en ese lugar. La unión entre estos dos cuerpos, provocó que se generara un cuerpo entre estos dos grandes bloques y con ello una falla, este bloque generado está asociado al movimiento de formación, la falla de Ticul se encuentra localizada a unos 105 kilómetros dentro del perfil GH1.

Los cuerpos centrales del modelo son representados como una zona de baja densidad del orden de  $1.9 \text{ g/cm}^3$  a  $2.1 \text{ g/cm}^3$ , con una profundidad de aproximadamente 4.64 kilómetros hasta los 23.87 kilómetros de profundidad, esta zona es representada por una zona de roca caliza dolomitizada, la cual contiene fracturas y fallas, lo que permite la infiltración de agua y sedimentos, los cuales provocan que esta zona tenga una densidad tan baja.

En la parte derecha más distal del modelo, se observa que la línea de adquisición vuelve a tener una pendiente o un decaimiento, esto nos habla a que dicha estructura continua, pero no se puede resolver ni interpretar ya que sale del margen de estudio (Figura 47).



**Figura 47.-** Modelos representativo de la zona sur del cráter de Chicxulub. Se tienen 3 zonas importantes. a).- Los cuerpos someros. b).- Los cuerpos laterales. c).- Los cuerpos centrales.

El modelo Chicxulub 04 (Figura 48), fue realizado con diferentes cuerpos estructurales, que determinan la complejidad de la anomalía obtenida por los valores de gravedad observada. Estos cuerpos estructurales que representan el modelo cuantitativo tienen una densidad promedio que van desde  $1.9 \text{ g/cm}^3$  a  $2.67 \text{ g/cm}^3$ . Se ha realizado el modelo para una profundidad aproximada del orden de los  $24.665 \pm 0.795$  kilómetros de profundidad.

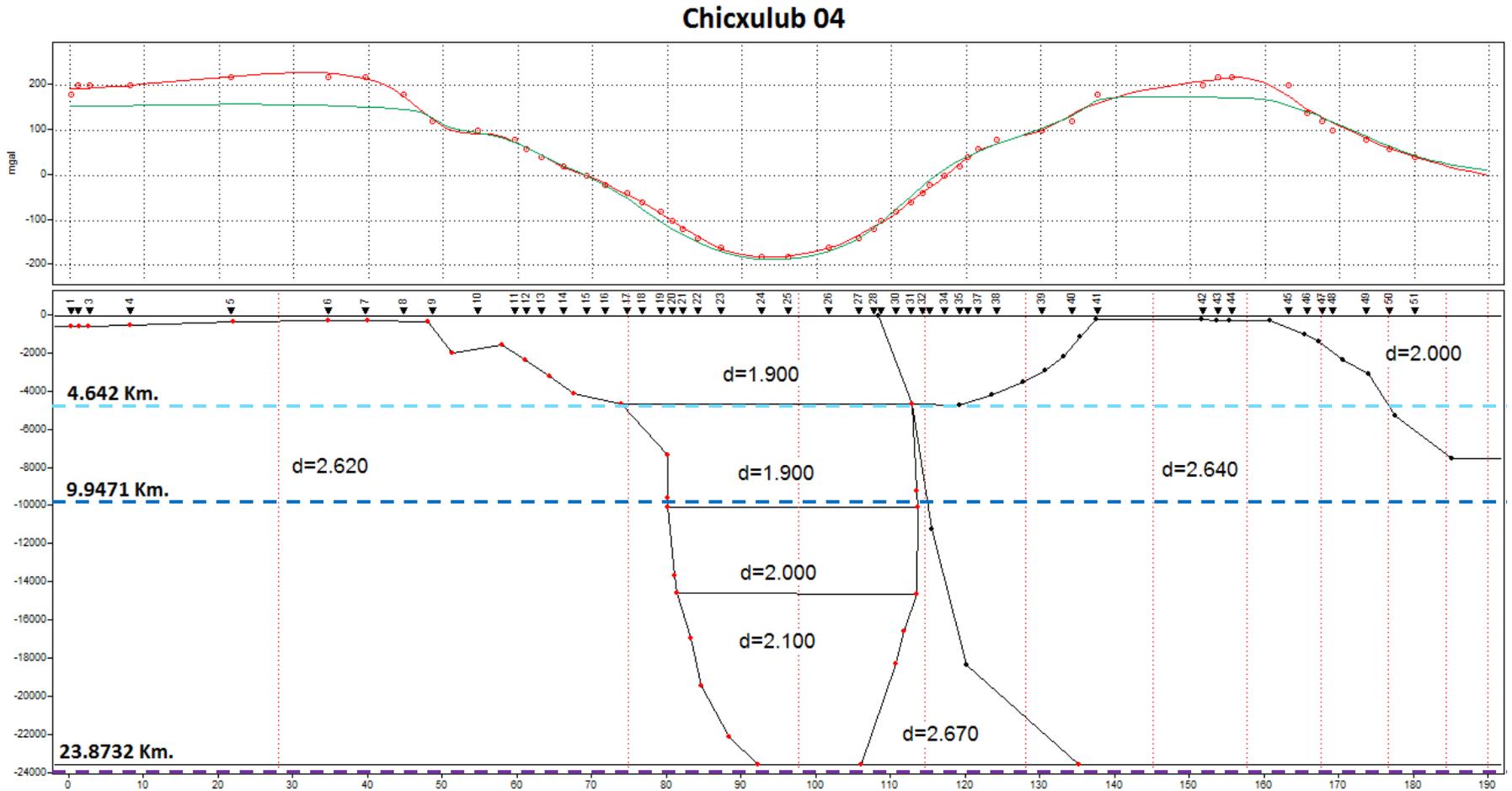
El cuerpo más superficial está dividido por una falla, el cuerpo del lado izquierdo tiene una densidad promedio de  $1.9 \text{ g/cm}^3$ , mientras que el cuerpo del lado derecho tiene una densidad promedio de  $2.0 \text{ g/cm}^3$ , la cual representa geológicamente una cuenca pre-existente separada por la falla de Ticul, la cual fue cubierta por una capa de sedimento de roca caliza, del lado izquierdo de la falla tuvo fracturamiento y del lado derecho solo la sedimentación, esta capa superficial tiene una profundidad de aproximadamente 4.64 kilómetros en la zona central que es muy profunda y de unas cuantas decenas de metros en las zonas laterales del modelo.

Los cuerpos laterales tienen una densidad del orden de  $2.62 \text{ g/cm}^3$  para el lado izquierdo del modelo y de  $2.64 \text{ g/cm}^3$  para el lado derecho del modelo, con una profundidad aproximada que va desde unas cuantas decenas de metros hasta los 23.87 kilómetros de profundidad en ambos bloques, esta zona representa dos bloques de diferente roca que tuvieron un movimiento pre-impacto y que se posicionaron en ese lugar. Del lado derecho del modelo, a una profundidad de 4.64 kilómetros hasta los 23.87 kilómetros, se muestra la línea que sigue la falla de Ticul, que también es representada en la superficie por imágenes satelitales, este cuerpo que se genera entre el cuerpo central y el cuerpo de bloque derecho, tiene una densidad de  $2.67 \text{ g/cm}^3$ .

La unión entre estos dos cuerpos, provocó que se generara un cuerpo entre estos dos grandes bloques, este bloque generado está asociado al movimiento de formación generando la falla de Ticul, la falla se encuentra localizada a unos 107 kilómetros dentro del perfil GH1.

Los cuerpos centrales del modelo son representados como una zona de baja densidad del orden de  $1.9 \text{ g/cm}^3$  a  $2.1 \text{ g/cm}^3$ , con una profundidad de aproximadamente 4.64 kilómetros hasta los 23.87 kilómetros de profundidad, esta zona es representada por una zona de roca caliza dolomitizada, la cual contiene fracturas y fallas, lo que permite la infiltración de agua y sedimentos, los cuales provocan que esta zona tenga una densidad tan baja.

En la parte derecha más distal del modelo, se observa que la línea de adquisición vuelve a tener una pendiente o un decaimiento, esto nos habla a que dicha estructura continua, pero no se puede resolver ni interpretar ya que sale del margen de estudio (Figura 48).



**Figura 48.-** Modelos representativo de la zona sur del cráter de Chicxulub. Se tienen 4 zonas importantes. a).- Los cuerpos someros. b).- Los cuerpos laterales. c).- Los cuerpos profundos. d).- Los cuerpos centrales.

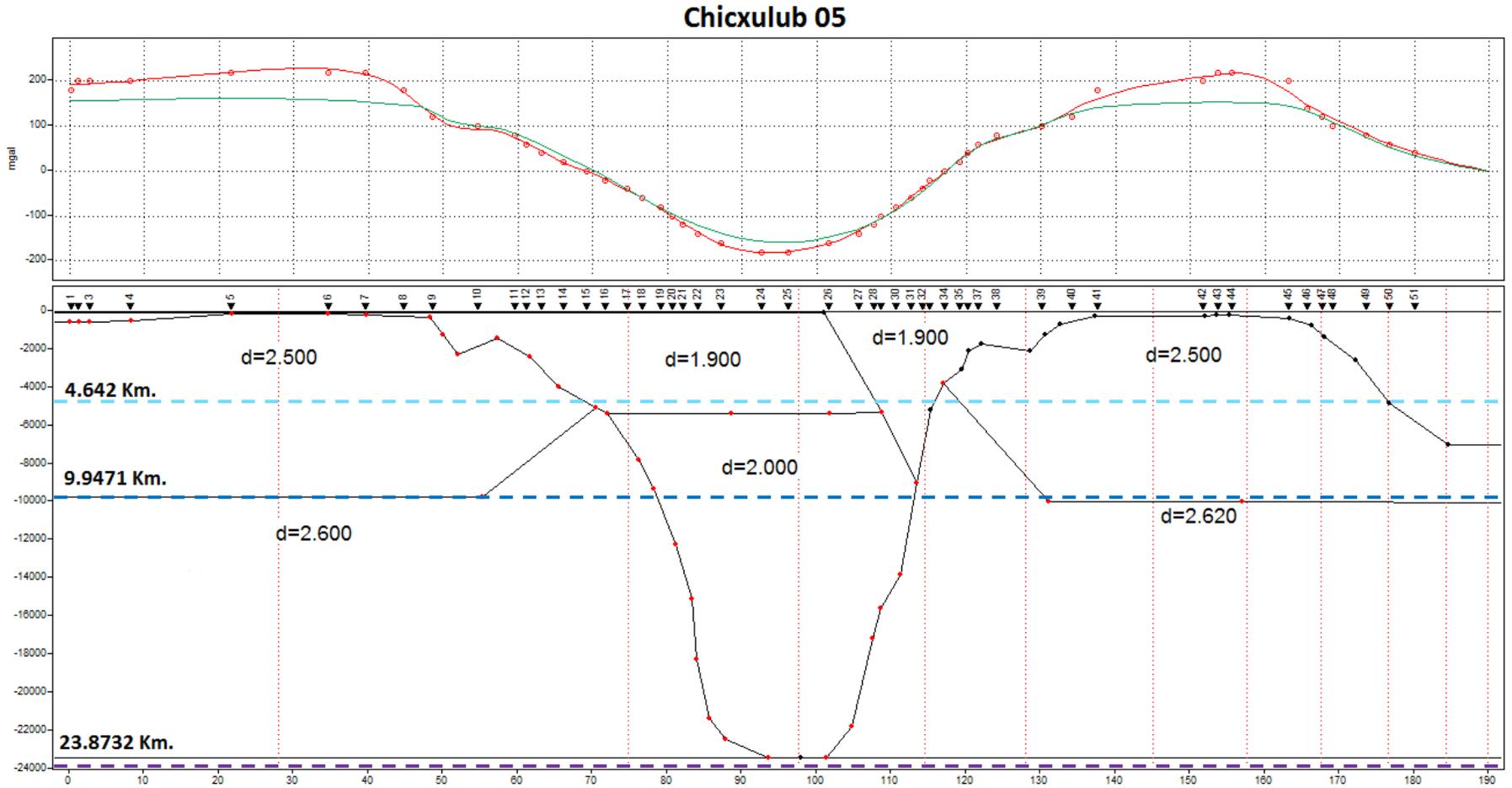
El modelo Chicxulub 05 (Figura 49), fue realizado con diferentes cuerpos estructurales, que determinan la complejidad de la anomalía obtenida por los valores de gravedad observada. Estos cuerpos estructurales que representan el modelo cuantitativo tienen una densidad promedio que van desde  $1.9 \text{ g/cm}^3$  a  $2.62 \text{ g/cm}^3$ . Se ha realizado el modelo para una profundidad aproximada del orden de los  $24.665 \pm 0.795$  kilómetros de profundidad.

El cuerpo más superficial está dividido en 4 grandes cuerpos, los dos grandes cuerpos centrales de baja densidad están divididos por una falla, los cuerpos tienen una densidad promedio de  $1.9 \text{ g/cm}^3$ , la cual representa geológicamente una cuenca pre-existente separada por la falla de Ticul, la cual fue cubierta por una capa de sedimento de roca caliza, del lado izquierdo de la falla tuvo fracturamiento y del lado derecho solo la sedimentación, esta capa superficial tiene una profundidad de aproximadamente 4.64 kilómetros en la zona central y de unas cuantas decenas de metros en las zonas laterales del modelo. Los otros dos grandes cuerpos, se refieren a las zonas que provocan alta anomalía, que tienen una densidad de  $2.5 \text{ g/cm}^3$ , que tienen una profundidad promedio de 9.95 kilómetros de profundidad.

Los cuerpos laterales profundos tienen una densidad del orden de  $2.6 \text{ g/cm}^3$  para el lado izquierdo del modelo y de  $2.62 \text{ g/cm}^3$  para el lado derecho del modelo, con una profundidad aproximada de 9.95 kilómetros hasta los 23.87 kilómetros de profundidad en ambos bloques, esta zona representa dos bloques de diferente roca que tuvieron un movimiento pre-impacto y que se posicionaron en ese lugar. Del lado derecho del modelo, a una profundidad de 9.95 kilómetros, se muestra la línea que sigue la falla de Ticul hasta la superficie, asociado al movimiento de formación, la falla en superficie se encuentra localizada a unos 105 kilómetros dentro del perfil GH1.

El cuerpo central del modelo es representado como una zona de baja densidad del orden de  $2.0 \text{ g/cm}^3$ , con una profundidad de aproximadamente 4.64 kilómetros hasta los 23.87 kilómetros de profundidad, esta zona es representada por una zona de roca caliza dolomitizada, este cuerpo contiene fracturas y fallas, lo que permite la infiltración de agua y sedimentos, los cuales provocan que esta zona tenga una densidad tan baja.

En la parte derecha más distal del modelo, se observa que la línea de adquisición vuelve a tener una pendiente o un decaimiento, esto nos habla a que dicha estructura continua, pero no se puede resolver ni interpretar ya que sale del margen de estudio (Figura 49).



**Figura 49.-** Modelos representativo de la zona sur del cráter de Chicxulub. Se tienen 3 zonas importantes. a).- Los cuerpos someros. b).- Los cuerpos laterales. c).- Los cuerpos centrales.

# **Capítulo V**

## **Discusión**

## DISCUSIÓN

### Posibles trayectorias de impacto

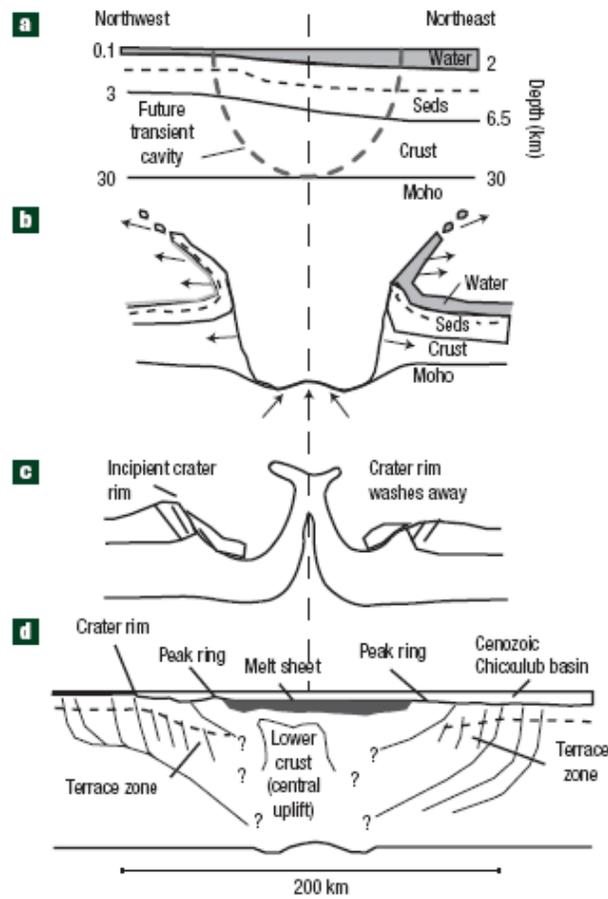
Los resultados de análisis de trayectorias de impacto, modelados de laboratorio, modelos dinámicos y experimentos de impacto, muestran que la extinción de los organismos se debió a efectos de la colisión de un bólido de grandes dimensiones en la superficie terrestre (se estimó el tamaño del asteroide en unos  $10\pm 4$  kilómetros de diámetro y sugirieron que el impacto dio lugar a una nube de polvo que cubrió al planeta por un periodo de varios meses).

Se ha estimado que la energía liberada en el momento del impacto y fue de unos  $4.3 \times 10^{23}$  Joules, que equivale a unos 191,793 Gigatonnes de TNT. Un impacto de tal dimensión en una plataforma carbonatada con evaporitas facilitaría el ingreso a la atmósfera de vapor de agua, bióxido de carbono, compuestos de nitrógeno o azufre, que incrementarían los efectos nocivos en la biósfera (lluvia ácida, entre otros).

El cráter Chicxulub es uno de los 3 mayores cráteres de impacto en la Tierra. Es el más joven, data de 65 millones de años de edad, es un cráter multi-anillo, completamente preservado, debido al entierro del cráter por sedimentos carbonatados en la plataforma de Yucatán y la protección de la atmósfera terrestre, así como de lluvia normal y constante.

El mapa del Cretácico-Tardío de la superficie por lo tanto, sugiere que el área del bólido golpeó y realizó importantes variaciones batimétricas laterales o también llamado estudio de la profundidad marina lateral, la magnitud exacta de esta variación es incierto debido a la expulsión del material dentro del cráter transitorio, la erosión del suelo por la marejada y los posibles hundimientos menores del Cenozoico.

Se sugiere que esta batimetría pre-existente tenía un fuerte control sobre la estructura del cráter final, de tal manera que en el oeste W, donde el agua era poco profunda, la cantidad de sedimento y del basamento vaporizado o expulsado fue mayor, mientras que en el noreste NE, la nube de vapor y de material expulsado proximal habría consistido en mayor cantidad de agua (Figura 50).



**Figura 50.-** Etapas de la formación dentro de la estratigrafía asimétrica pre-impacto. Las secciones transversales muestran cuadrantes del noroeste NW y noreste NE. **a).**- Imagen del pre-impacto que muestra el área del cráter transitorio y de la profundidad aproximada de agua, los sedimentos (línea discontinua que representa el horizonte marcado de evaporitas), la corteza y el Moho. **b).**- La formación de la cavidad transitoria donde las asimetrías objetivo dan lugar a variaciones locales-regionales en depósitos elevados y depósitos de material expulsado. **c).**- Etapa de modificación del cráter con elevación central asimétrica colapsada. **d).**- Morfología asimétrica del cráter final, incluyendo la falta de anillo del cráter en el noreste NE y del material más grueso del anillo de pico, así como de profundos bloques de caída colocados hacia el noroeste NW. Estructura de la elevación central y de las asimetrías en el Moho, provienen de estudios anteriores.

Uno de los efectos de la variación de la profundidad de agua en el momento del impacto de Chicxulub, es que las asimetrías en la cantidad proximal de material expulsado podría no esperarse una relación con la dirección del impacto (Figura 50a, b). La profundidad de 650 metros de agua sugiere que la nube de vapor de agua en Chicxulub puede haber incluido una concentración máxima de 22 a 54% de agua de mar. Esta observación tiene implicaciones para el modelado del medio ambiente de la extinción en masa, dada la importancia de la nube de vapor de agua en la formación de aerosoles de sulfato y un efecto invernadero post-impacto.

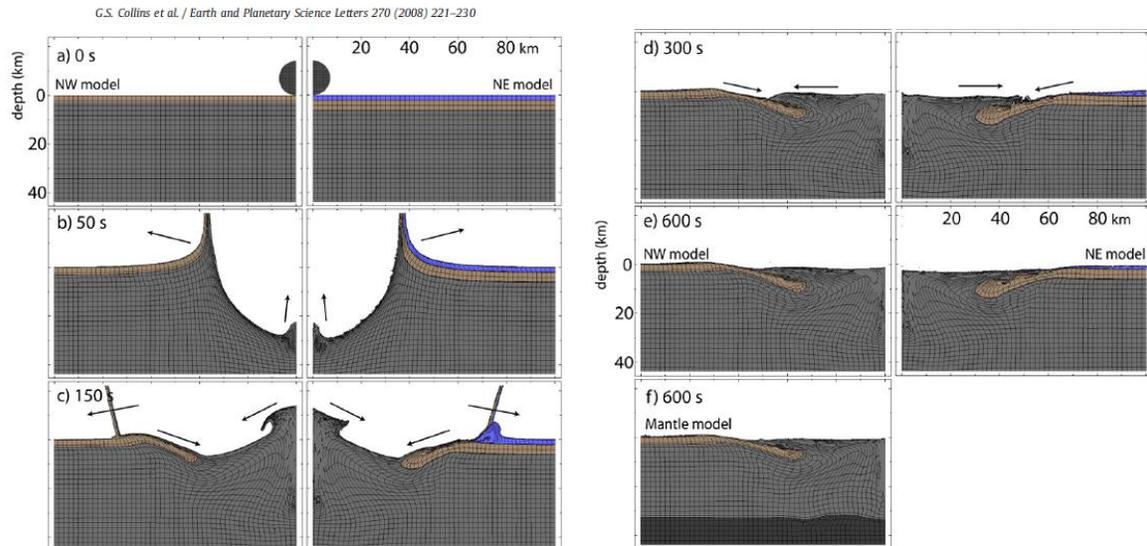
El origen de estas zonas en la corteza y de sus geometrías originales se desconocen. Por lo tanto, las asimetrías en la corteza y las asimetrías resultantes de las fallas dentro de los anillos pueden ser explicadas por una corteza inferior bien ondulada pre-existente, como una cavidad asimétrica transitoria formada por un impacto oblicuo.

Estudios anteriores, han sugerido la importancia de las propiedades objetivo en la morfología del cráter. En el laboratorio, los proyectiles balísticos disparados en polvo de piedra pómez húmeda, producen asimetrías similares que las producidas en pruebas de balística para polvo seco. En la tierra, la cartografía de varios otros cráteres reveló una elevación central asimétrica que se ha sugerido que es el resultado de las heterogeneidades de destino. Las imágenes en Chicxulub, las observaciones en laboratorio y las observaciones superficiales, realizadas en tercera dimensión para un evento donde las asimetrías del cráter han sido utilizadas para diagnosticar la trayectoria del impacto.

Los resultados de modelos numéricos indican que para impactos oblicuos, predice que el impacto varía de acuerdo con la dirección, el mayor rango de material expulsado es el de mayor impacto. Para ángulos de impacto oblicuos de  $15^\circ$  a  $45^\circ$ , se espera que el material proximal expulsado desapareció en la dirección del cuerpo que impacta, pero las secuencias estratigráficas del material proximal expulsado son observados en el sureste SE (Belice), el este E (Haití) y el sur S de Chicxulub (México). Estas observaciones combinadas sugieren que el impacto, sí es oblicuo, probablemente fue de un ángulo mayor a  $45^\circ$ .

Experimentos de laboratorio para impactos oblicuos, demuestran que la energía cinética está involucrada con la excavación del cráter que disminuye de manera significativa con el ángulo de impacto. La masa desplazada de un cráter disminuye con el ángulo de impacto. Para estos casos un ángulo alto es una trayectoria vertical.

Los datos sísmicos revelan qué, en el momento del impacto, tanto en la profundidad del agua y el espesor de los sedimentos, varió con azimut alrededor del lugar del impacto. La zona escalonada asimétrica y el objetivo asimétrico del pre-impacto están fuertemente correlacionados, lo que sugiere que la heterogeneidad en el objetivo inicial podría haber afectado a la geometría del cráter final.



**Figura 51.-** Los resultados de la modelación numérica. El gris es basamento cristalino, el café son sedimentos y el azul es agua. La malla conecta las partículas de Lagrangiano, que muestra la deformación del material. Las flechas indican las direcciones de los mayores movimientos. El modelo noroeste **NW (izquierda)** no se utiliza la capa de agua pero sí una capa de sedimentos de 3 kilómetros y representa la estructura objetivo al noroeste **NW** del centro del cráter. El modelo noreste **NE (derecha)** utilizó una capa profunda de agua de 2 kilómetros y una capa gruesa de sedimentos de 4 kilómetros y representa la estructura objetivo al noreste **NE** del centro del cráter (de la **a-e**). También se muestra el cuadro final de tres capas del modelo noroeste **NW (f)**, incluidos los del manto (gris oscuro), para la comparación con el modelo de dos capas en el noroeste **NW**.

Las asimetrías en los patrones de las anomalías del campo potencial, particularmente en los sectores de la costa, han sido utilizadas para deducir el ángulo de impacto y su trayectoria.

Se han sugerido trayectorias para el cráter de impacto de Chicxulub, uno de ellos es un impacto oblicuo dirigido del noroeste NW que ha sido relacionado con efectos ambientales y la distribución del material expulsado, así como el cuarzo impactado en el interior de las secciones de Norteamérica (Claeys, Kiessling et al. 2002).

Desde la confirmación de que la estructura de Chicxulub enterrada es la más buscada en los límites del cráter del Cretácico-Terciario, numerosos esfuerzos se han dedicado a modelar el evento del impacto y la estimación de la cantidad de material en el lugar que fue sometido a la fusión y a la evaporización.

Anteriores simulaciones de hidrocódigo, modelaron el evento de Chicxulub como un impacto vertical. El modelado de simulación de un asteroide de 10 kilómetros de diámetro, impactando en 20 km/s en un blanco de litología similar al del sitio de Chicxulub. Los ángulos del modelo de impacto son de 90° (vertical), 60°, 45°, 30° y 15° con respecto a la superficie. Encontraron que la cantidad de sedimento (capa superficial) se vaporizó en el impacto alcanzando un máximo para un ángulo de impacto de 30° con respecto a la superficie, que corresponde a menos de dos veces la cantidad de vaporización para el caso vertical. La desgaseificación de la capa sedimentaria, sin embargo, cae abruptamente a un ángulo de

impacto de 15°. La cantidad de corteza continental derretida en el impacto disminuye de forma monótona (como consecuencia de la disminución de la profundidad máxima de la roca fundida) de la capa de impacto vertical para el impacto de 15°. El derretimiento y la vaporización se producen principalmente en la dirección hacia el suelo para los impactos oblicuos, debido a las asimetrías en la fuerza de la onda de choque en relación con el punto de impacto. Los resultados pueden ser usados para la escala de la información de las simulaciones vertical disponibles para corregir el ángulo de impacto.

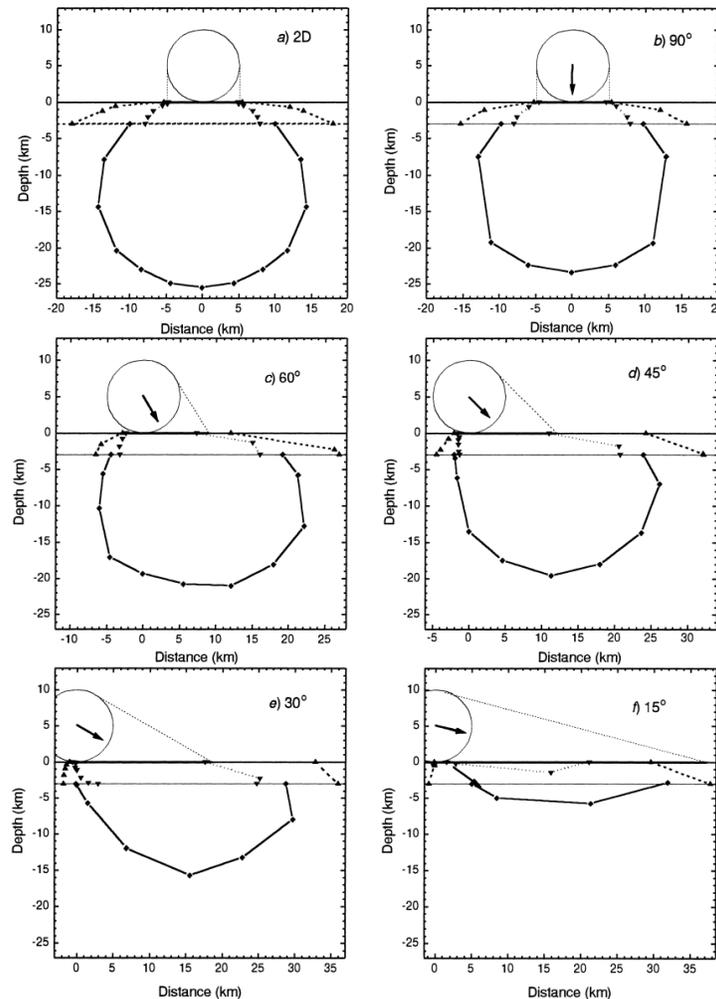
El análisis de las simulaciones a diferentes ángulos de impacto, sugieren:

1.- La región de la corteza continental superficial derretida como el ángulo de impacto disminuye, como se ilustra en la Figura 52b-f. En particular, la profundidad de derretimiento disminuye de manera significativa con el ángulo de impacto y la región de derretimiento se desplaza hacia en suelo del punto de impacto.

2.- La cantidad de gases que se desprenden de la capa sedimentaria, aumenta menos de un factor de 2 para un impacto de 30° con respecto al caso vertical. Este resultado parece coincidir con el aumento de la huella de un proyectil por  $1/\text{seno}(\theta)$ . Esta correspondencia, sin embargo, se rompe para ángulos de impacto menores, como lo sugiere la simulación de impacto de 15°. Este resultado se muestra (Figura 52f).

3.- La cantidad del proyectil arrastrado en el penacho de expansión en las primeras fases del impacto aumentan a medida que disminuye el ángulo de impacto. Mientras que para un impacto no vertical el proyectil es arrastrado en el penacho de expansión en los primeros 5 segundos después del impacto, más del 50% es arrastrado en el impacto de 15°. Por desgracia, las simulaciones no continúan lo suficiente para ver como esto podría influir en el arrastre de la distribución del material de todo el mundo. Por otro lado, las mediciones de los indicadores geoquímicos del proyectil en el registro geológico, hasta ahora, no son una herramienta confiable para la extracción de los patrones geográficos de distribución de proyectiles y una comparación con el registro geológico no sería posible.

4.- La producción de gases de efecto climáticamente activos en los eventos de impacto oblicuo es menor que un factor de dos para grandes impactos verticales. Más desgaste puede ocurrir en los impactos de ángulo bajo debido al calentamiento por cizalladura.



**Figura 52.-** Ejemplo de la forma completa de la región fundida para el granito la línea continua, por debajo de los 3 kilómetros, la calcita es la línea semi-continua y la anhidrita en la línea de puntos, en la capa sedimentaria. **a)** Simulaciones en 2D y 3D con ángulos de impacto, **b)** 90°, **c)** 60°, **d)** 45°, **e)** 30°, **f)** 15°. Los símbolos corresponden a las distancias a lo largo de las filas de las partículas trazadas en el que la presión en GigaPascales de descarga máxima es igual a 56 (diamantes), 20 (triángulos hacia arriba) y 100 (triángulos hacia abajo). La línea continua de trazo grueso: la huella del proyectil.

Estudios de cráteres observados en las superficies planetarias y en experimentos de laboratorio de impactos oblicuos en ángulos mayores de 30° a la superficie del objetivo, producen cráteres circulares. Debido a la distribución mundial de cuarzo de choque es compatible con un impacto individual de ángulo alto.

La mayoría de los asteroides golpean a sus objetivos en un ángulo oblicuo o que no es recto (Pierazzo, Melosh et al. 1999). El criterio común para la identificación de cráteres formados por un impacto oblicuo es el modelo de la capa de sedimento del material expulsado que raramente son preservados, la morfología, lo estructural, la geofísica, así como los criterios de sedimentación que utilizamos para inferir un impacto oblicuo (Schultz, D'Hondt et al. 1996); (Stöffler, Artemieva et al. 2002); (Tsikalas 2005). Sin embargo, la importancia de dichos criterios en la predicción de la dirección o ángulo de impacto, es un

tema de debate (Schultz P. H., Anderson R. R. et al. 1996); (Ekholm, Melosh et al. 2001). Particularmente, no se sabe si hay una influencia del ángulo de impacto en el campo de desplazamientos durante el colapso de las grandes cavidades transitorias, y por lo tanto, el cráter final.

Para la mayoría de los ángulos de impacto, la forma del cráter final es controlada por su tamaño. En un diámetro crítico (de 2 a 5 kilómetros en la Tierra), los cráteres simples en forma de cuenca son gravitacionalmente inestables y colapsan para formar cráteres complejos, con un piso plano y un borde de terraza (Melosh 1989). Durante el colapso, el suelo del cráter se eleva hasta formar una elevación central, que puede o no ser visible como un pico central, o bien, cuando el pico de colapsos a su vez, como un anillo de pico en diámetros aún mayores.

Con base en análisis previos de los pequeños cráteres de Venus, se muestra que las variaciones en la posición del pico central no tienen relación con la dirección del impacto para los impactos oblicuos. El desplazamiento del pico central al recorrido del impacto que parece ser una simplificación de los procesos de formación de cráteres.

El anillo de pico circular del cráter de impacto de Chicxulub no es concéntrico con el borde exterior de la estructura, tal como se define tanto para la gravedad y los datos sísmicos. Aunque esto se ha atribuido a un impacto oblicuo y se utiliza para definir la dirección aproximada del meteorito de impacto, algunos grupos han sugerido azimutes sobre la base de los conjuntos de datos. Se investiga la supuesta relación entre el offset del anillo de pico y el azimut del impactador, mediante el estudio de 19 cráteres de anillo de pico en Venus, por lo que la dirección del impactador se conoce de su material expulsado asimétrico. No se encontró alguna correlación estadísticamente importante entre el offset del anillo de pico y la aproximación del azimut del impactador.

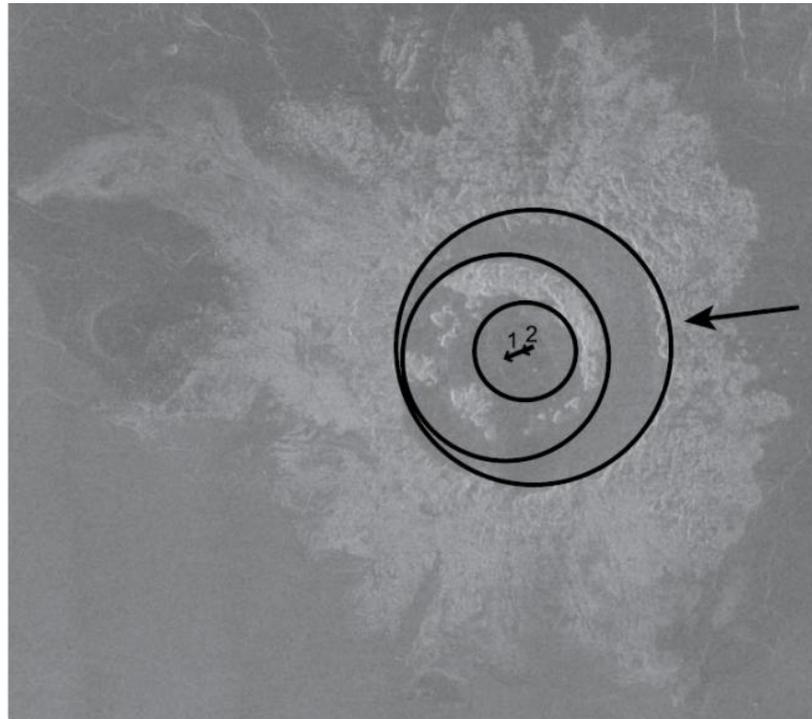
La trayectoria de un bólido incidente es importante para entender las consecuencias ambientales después del impacto, especialmente en la Tierra. La catástrofe local es mayor en la dirección hacia el suelo (Pierazzo, Melosh et al. 1999); (Schultz, D'Hondt et al. 1996). La masa de sedimentos vaporizados y la liberación de la corteza al medio ambiente después de un evento de impacto, se dice que incrementa con la disminución del ángulo de impacto (Schultz, D'Hondt et al. 1996), aunque otros estudios hacen esto pobremente cierto (Pierazzo, Melosh et al. 1999). El indicador más fiable del ángulo de elevación y de la dirección de la trayectoria de un impactador es el patrón asimétrico de material expulsado (Pierazzo, Melosh et al. 1999). Desafortunadamente, debido a la erosión activa de la Tierra, tales expulsiones de material rara vez se conservan alrededor de los cráteres de impacto terrestres. Por esta razón, muchos autores han buscado un indicador estructural de la oblicuidad del impacto.

(Schultz, D'Hondt et al. 1996), sugieren una dirección noroeste NW hacia el suelo, la cual dice que las estructuras centrales están desplazadas lejos de las excavaciones superficiales causadas por el impacto oblicuo y sugieren que la interacción entre el anillo de pico, la dirección del impacto oblicuo y la forma de la cavidad transitoria, no son entendibles.

(Hildebrand, Pilkington et al. 1998), sugiere una dirección noreste NE, que corresponde a una zona de terraza más profunda y más gradual comparada con el noroeste NW (Gulick, Barton et al. 2008), lo que sugiere que el anillo de pico fue desplazado lejos de la pared empinada de la cavidad transitoria. Las

anomalías gravimétricas han sido interpretadas en términos de un impacto oblicuo superficial, con trayectorias SW-NE o SE-NW.

Los datos sísmicos indican que en el cráter de Chicxulub, carece de un pico central bien definido, pero tiene un anillo de pico circular (Morgan, Warner et al. 1999), que es típico de los cráteres de este tamaño (alrededor de unos 180 kilómetros de diámetro). De esta manera (Ekholm, Melosh et al. 2001), extendió el análisis para examinar la relación entre el offset del anillo de pico y el azimut del impactador para los cráteres de anillo de pico de Venus.



**Figura 53.-** Mediciones del offset del anillo de pico para el cráter Leyster en Venus. Leyster es un cráter de impacto en Venus más oblicuo ( $10^{\circ}$ - $40^{\circ}$ ), con una bien definida zona prohibida de alto rango y material expulsado de bajo rango concentrado. El offset del anillo de pico está definido como el promedio de los vectores que se extienden del centro del cráter al centro de la parte interna (vector 2) y al exterior del anillo de pico (vector 1) en relación con la dirección del impacto normalizado a  $0^{\circ}$ .

Los análisis de cada cráter de Venus resultan en un vector que muestra la magnitud y la dirección calculada del offset del anillo de pico. Para estandarizar el análisis, las magnitudes del offset del anillo de pico son normalizados en función del diámetro del círculo correspondiente a la parte exterior del suelo del cráter, no el diámetro del cráter que es mucho más difícil estimar su precisión.

Este análisis estadístico, se vio limitado por el muestreo de solo 19 cráteres de Venus, y aún así da una idea sobre la relación entre el offset del anillo de pico y la dirección del impacto.

Se ha visto el offset de la estructura central en datos de anomalías gravimétricas (Hildebrand, Pilkington et al. 1998), que argumentan no estar relacionados con la trayectoria del impacto, sobre la base de este análisis de los cráteres de Venus. Los datos de gravedad proporcionan restricciones útiles sobre el offset de las estructuras centrales de Chicxulub, ya que proporcionan una cobertura completa dentro y fuera del

cráter, mientras que los datos de sismica de reflexión cubren solamente el sector fuera del cráter. A pesar de que la topografía del anillo de pico no está bien representada en los datos de gravedad (Morgan, Warner et al. 1999), el offset de todas las estructuras centrales de Chicxulub, incluyendo el anillo de pico, han sido vinculados junto al centro de simetría visto en los datos de anomalía gravimétrica (Morgan, Warner et al. 1997); (Schultz, D'Hondt et al. 1996).

Los resultados obtenidos en Venus para añadir, sugieren que la posición del anillo de pico, no está determinado por la dirección del impacto para los impactos oblicuos. Es posible que no tenga una inclinación sistemática de alto rango en la cavidad transitoria como implica un resultado experimental (Gault, Wedekind et al. 1978), o que la inclinación de alto rango se ve sombreada por factores dominantes como las heterogeneidades objetivo según lo sugerido por (Gulick, Urrutia-Fucugauchi et al. 2008).

Un análisis posterior por (Ekholm, Melosh et al. 2001) cuestiona la validez de los métodos de (Schultz, D'Hondt et al. 1996) y de (Hildebrand, Pilkington et al. 1998), mostrando que en el offset del pico central de los cráteres en Venus (para lo cual las trayectorias de impacto, se conocen los patrones asimétricos de material expulsado), son esencialmente al azar con respecto al azimut del impactador.

Los espesores y las características de la capa de arcilla mundial se han analizado desde los primeros estudios por (Alvarez, Alvarez et al. 1980), mostrando que la anomalía de iridio y las características de la capa de arcilla, no tenían ninguna relación aparente para la posición geográfica del impacto. Un nuevo análisis realizado por (Morgan, Lana et al. 2006), concluyó que la distribución mundial de cuarzo de choque es compatible con un impacto individual de ángulo alto.

La energía cinética está involucrada con la excavación del cráter que disminuye de manera significativa con el ángulo de impacto.

Los patrones de falla pueden servir como criterios generales para determinar la dirección del impacto de las estructuras de impacto profundamente erosionadas.

Un impacto oblicuo es probable que haya sido mucho más catastrófico que un impacto sub-vertical, debido a mayores volúmenes de sustancias volátiles que han sido lanzadas a la atmósfera.

Los cráteres de impacto muestran que el metamorfismo de impacto contiene fases minerales como el cuarzo y el circón, que muestran una amplia gama de características metamórficas de impacto.

Caracterizar el cuarzo de impacto o choque en material expulsado a distancia en el periodo (K-Pg), aún se investiga si hay la posibilidad de que la distribución de cuarzo lleve la firma de la dirección y del ángulo de impacto. Estos análisis muestran que el número total, el tamaño máximo y el promedio de todos los granos de cuarzo de impacto, disminuyen gradualmente con la paleodistancia de Chicxulub, y esta disminución es bastante simétrica. Esto contradice estudios previos que proponen que el cuarzo impactado era más abundante de lo esperado en el Pacífico y relativamente raro en Europa.

Una comparación entre los estudios no relacionados, puede haber llevado a la interpretación incorrecta de que la distribución de cuarzo deformado o impactado fue asimétrica.

Un sitio en el Atlántico sur contiene cuarzo que indica una anomalía de grado alto de impacto, que puede ser indicativo de un impacto oblicuo con una dirección amplia hacia el sureste  $\pm 45^\circ$ . También la presencia de la secuencia estratigráfica de material proximal expulsado en los sitios del sur, sureste y este de Chicxulub indican que, si el impacto fue oblicuo y hacia el sureste, el ángulo de impacto fue de más de  $45^\circ$ .

Estudios previos han pronosticado que Chicxulub produjo un efecto dramático en el clima de la Tierra, porque este fue formado por un impacto oblicuo de bajo ángulo en sedimentos volátiles.

Las asimetrías en la corteza y las asimetrías resultantes de las fallas dentro de los anillos pueden ser explicadas por una corteza inferior bien ondulada pre-existente, como una cavidad asimétrica transitoria formada por un impacto oblicuo.

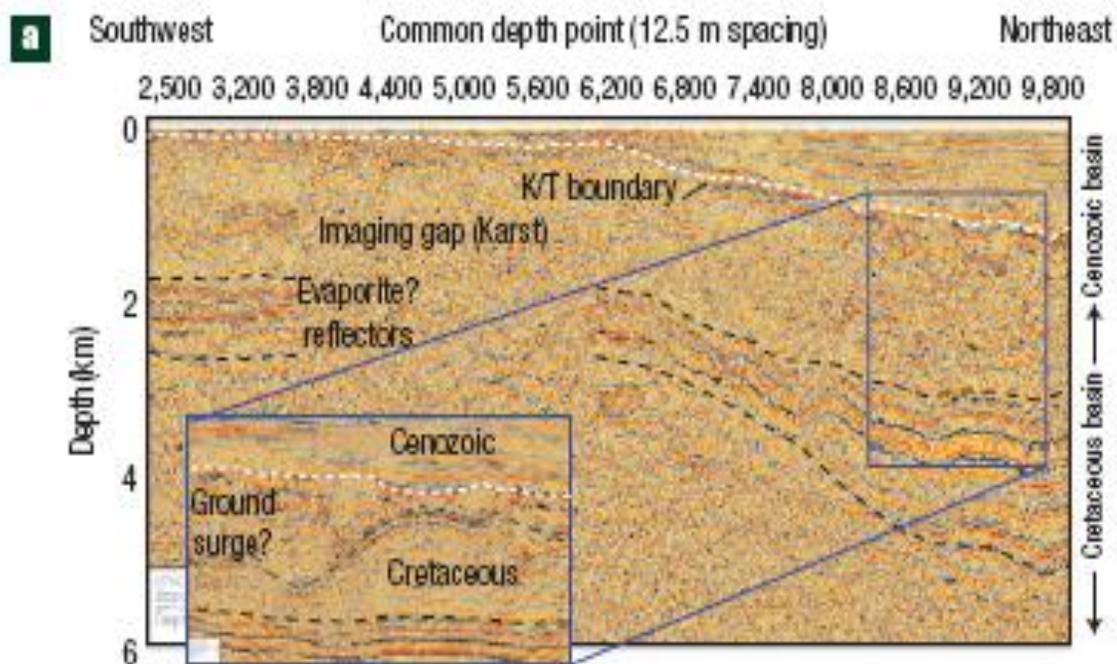
El indicador más fiable del ángulo de elevación y de la dirección de la trayectoria de un impactador es el patrón asimétrico de material expulsado (Pierazzo, Melosh et al. 1999). Desafortunadamente, debido a la erosión activa de la Tierra, tales expulsiones de material rara vez se conservan alrededor de los cráteres de impacto terrestres. Por esta razón, muchos autores han buscado un indicador estructural de la oblicuidad del impacto.

## Estructuras pre-existentes

Los estudios que explican la historia geológica y la formación de cráteres, serán determinantes para la interpretación de las estructuras pre-existentes de la zona sur del cráter de Chicxulub.

El cráter de Chicxulub se encuentra una parte en el mar y otra en la tierra, esto provoca que sean dos objetivos de impacto diferentes, lo que dio lugar a diferentes geometrías de la zona de terraza, lo que indica que las no heterogeneidades objetivo pueden influir en la estructura del cráter.

Un perfil de radio constante (Figura 54a) fuera de las fallas de anillo interior, muestra estratos del Cretácico profundo y de poco espesor en un bajo topográfico hacia el noreste NE. Se sugiere que estos estratos reflejan la presencia de una cuenca pre-existente del Cretácico al norte N y al noreste NE ahora cubierta por una extensión de la cuenca de Chicxulub, debido a la ausencia de un borde del cráter del noreste NE. En el oeste W, la superficie del Cretácico-Tardío contiene un alto topográfico que también se interpreta como una estructura pre-existente, dada la estratigrafía y la falta de fallas convergentes dentro de los anillos. Una reflexión ondulatoria que trunca los sedimentos subyacentes del Cretácico (Figura 54, el recuadro) está por debajo de la superficie del Cretácico-Tardío en el noreste NE.



**Figura 54.-** Evidencia de cuencas pre-existentes del Cretácico. **a).**- Perfil sísmico de radio constante, se disparó a una distancia de 85 kilómetros de radio desde el centro del cráter. Horizontes que hacen un seguimiento de la zona de terraza en el interior del cráter son observados aquí para profundidad y espesor, en una cuenca pre-existente hacia el noreste NE. El reflector aproximado de la superficie profunda del Cretácico-Tardío, muestra evidencia de erosión. **Recuadro).**- Algo caótico, posible aumento de depósitos de tierra encima de un reflector, puede ser un plano de desplazamiento.

El cráter está caracterizado por anomalías concéntricas semi-circulares, las cuales fueron inferidas aproximadamente a  $52.5 \pm 5$  kilómetros, a  $77.1 \pm 6.3$  kilómetros, a  $99.6 \pm 6$  kilómetros y a  $139 \pm 11$  kilómetros de distancia radial, también observa un reflector aproximadamente de  $1.1 \pm 0.4$  kilómetros de profundidad.

Estudios sísmicos reflejan la presencia de una cuenca pre-existente del Cretácico y de zonas de baja gravedad al norte N y al noreste NE ahora cubierta por la estructura del cráter de Chicxulub, las cuales han sido estudiadas por otros autores, sin embargo se presenta otra grande anomalía de baja gravedad al sur S del cráter, la cual no ha sido puesta a estudios de investigación y discusión, en este trabajo se discute la propuesta de que la anomalía esté asociada a una estructura pre-existente modificada por el impacto.

Se propuso una interpretación para el análisis de esta zona, la explicación es que se trate de una zona de sutura, la cual está reactivada por una falla geológica y esto provocó que se originara una cuenca, la cual se ha estado sedimentando por carbonatos. La zona de sutura sugiere que sean dos unidades de diferente roca que están juntas debido al choque de dos paquetes litológicos, la parte de la falla reactivada es que sea una unidad de roca que tienen un desplazamiento sobre otra, esto generó la falla de Ticul expuesta en la zona y el origen de la cuenca es debido a la falla geológica que permite la sedimentación de carbonatos en el sitio.

Con base en la gravimetría se identificó esta zona de contraste en la zona sur del cráter de Chicxulub, las cuales son dos zonas de alta gravedad divididas por una zona de baja gravedad al centro, que de acuerdo a la interpretación, es una zona de sutura de alta profundidad.

Los resultados de los cálculos y el modelado, revelaron que es un modelo de sutura-falla-cuenca, la cual es asociada con zonas pre-existentes al noreste NE de una cuenca y al oeste W, este último contiene un alto topográfico, así como la falta de fallas convergentes dentro de los anillos y dada la estratigrafía, realizadas por la prospección sísmica.

A esta región se le podría denominar zona de sutura pre-impacto Chicxulub y está localizada en la parte sur del cráter de Chicxulub, dentro de esta cuenca se encuentra atravesada por la falla de Ticul, en la cual tenemos que es una zona de secuencias sedimentarias carbonatadas con depósitos gruesos residuales de carbonato que se producen en áreas cercanas al Golfo de México, resultando la deformación que afecta la plataforma carbonatada. La cual ha sido cubierta desde entonces por carbonatos del Terciario post-impacto.

La zona de estudio en Chicxulub puede asociarse a un movimiento de sutura en la zona, este movimiento provocó una falla que permitió el desarrollo de una cuenca y que posteriormente hubo una acumulación de sedimentos de carbonato en el lugar. De acuerdo a estudios de magnetometría, en donde se puede observar la morfología y el tamaño del cráter, así como de las principales fuentes de anomalías magnéticas y la estructura del cráter.

La estructura de la zona sur del cráter Chicxulub es asimétrica, dadas las pendientes que se observan en las gráficas obtenidas de los datos de gravedad observada, ya que de un lado la pendiente es más larga.

Los modelos obtenidos pueden usarse como modelos cuantitativos, sin embargo aún falta ajustarlos, ya que también se observa que a falta de un mapa geológico del lugar o de un modelo sísmico, hace que el contraste no sea real, esto provoca que se tengan que hacer dichos ajustes y modelos más aproximados.

Los cálculos antes del modelado muestran que la longitud de onda tan grande nos genera modelos profundos, aproximadamente de  $24.665 \pm 0.795$  kilómetros. Si se modela fuera de este límite, caeríamos en modelos muy profundos, en la zona del manto en donde no hay presencia de cuencas. Para nuestro estudio, la profundidad calculada es aceptable.

Describiendo la estructura de la zona sur del cráter de Chicxulub, podemos explicar que es una cuenca alargada de mediana densidad, en su parte central se modela la zona de sutura que llega hasta grandes profundidades de baja densidad y en sus extremos se tiene la presencia de dos estructuras de alta densidad que están relativamente juntas, que probablemente tuvieron un desplazamiento.

Se intentaron realizar modelos someros, sin embargo, por las altas frecuencias espaciales o número de onda tan grande, difícilmente se asociarían a modelos de este tipo.

Uno de los problemas que se pueden encontrar en la interpretación de las estructuras pre-existentes en el área de Chicxulub, es que los procesos de alta energía pudieron haber actuado en el área del cráter, como los procesos de erosión por lavado. Estudios sugieren que el oleaje del mar en el cráter, resultó en la erosión de los depósitos de las brechas, posiblemente también afectó la morfología del anillo.

Finalmente, el objetivo principal de esta parte del trabajo de investigación también se cumple, debido a que estas anomalías alargadas se pueden asociar a diferentes orígenes, una de ellas es que son estructuras pre-existentes debidas a una zona de sutura que provocó dicha estructura, reactivada por una falla geológica, la cual originó una cuenca que fue modificada por el impacto y que siguen teniendo una modificación debida a la sedimentación de carbonatos Terciarios posteriores al impacto o de que aún esté activa la falla de Ticul.

Este estudio, tanto los mapas de anomalías gravimétricas, los métodos y los modelos cuantitativos, podrían ser la base de siguientes estudios geofísicos en la zona sur del cráter de Chicxulub, ya que no se cuentan con modelos sísmicos de esta zona. Este trabajo de investigación complementaria algún otro estudio geofísico, o en su defecto podría ser modificado o ajustado para una mejor representación y modelado de la zona.

# Conclusiones

## CONCLUSIONES

### Posibles Trayectorias de Impacto

Nuestras propuestas para las posibles trayectorias de impacto en la plataforma carbonatada de Yucatán, así como el modelo obtenido a partir de la anomalía gravimétrica en la zona sur del cráter de impacto de Chicxulub se concluyen en esta parte del trabajo de investigación.

La propuesta de nuestro estudio es la de un impacto oblicuo de bajo ángulo. Un criterio para la identificación de cráteres formados por el impacto oblicuo es la capa de sedimento del material expulsado que raramente es preservado, la morfología, el estudio estructural, la geofísica, así como de los criterios de sedimentación que se utilizan para inferir un impacto oblicuo.

Los resultados de experimentos de laboratorio para impactos oblicuos, han demostrado que la energía del proyectil que está involucrada en la excavación del cráter que disminuye con el ángulo de impacto. Esto también refiere a que la masa desplazada de un cráter disminuye con el ángulo de impacto.

Estudios geofísicos, han propuesto un impacto oblicuo en la zona del cráter de impacto de Chicxulub, la cual está vinculada con la capa de sedimentos de arcilla rica en iridio alrededor del mundo, que es el marcador estratigráfico del límite Cretácico-Tardío.

Estudios de sismica indican que el cráter de Chicxulub carece de un pico central bien definido, pero contiene un anillo de pico circular, que es típico de los cráteres de este tamaño.

La distribución en el tamaño y el número de granos de cuarzo de impacto disminuyen con la distancia radial aparente del cráter de Chicxulub, la cual es bastante simétrica. Esto contradice estudios previos que proponen que el cuarzo impactado es más abundante en el Pacífico y relativamente raro en Europa. El grado medio del choque, nos explica que la capa del Cretácico-Paleógeno (K-Kg) se creó por un solo, grande y sub-vertical impacto en Chicxulub. La anomalía en el sureste SE de Chicxulub, indica que la trayectoria de impacto es del tipo oblicuo.

Estudios de secuencia estratigráfica muestran que el material proximal expulsado en los sitios proximales radiales de Chicxulub, indican que fue un impacto oblicuo con dirección hacia el noroeste (NW), el cual estaría relacionado con un posible ángulo de impacto de más de 45°. Los cuales pronostican que Chicxulub produjo un efecto dramático en el clima de la Tierra, debido a un impacto oblicuo de bajo ángulo en sedimentos volátiles. El análisis del modelado del medio ambiente muestra implicaciones en extinción en masa en la Tierra, debido a la nube de vapor de agua, así como de la formación de aerosoles de sulfato y de un efecto invernadero post-impacto.

Los análisis de las simulaciones para diferentes ángulos de impacto, sugieren que la profundidad de derretimiento disminuye de manera significativa con el ángulo, la cantidad de gases que se desprenden de la capa sedimentaria aumenta para un ángulo de 30° con respecto al caso vertical, la cantidad de proyectil arrastrado en las primeras fases del impacto aumentan a medida que disminuye el ángulo y también que la producción de gases de efecto climáticamente activos para un evento oblicuo es menor que para grandes impactos verticales.

Estudios de trayectorias de impacto han propuesto la importancia que tiene el impacto de un bólido, esto para entender las consecuencias ambientales después del impacto, especialmente en la Tierra. La catástrofe local es mayor en la dirección de impacto hacia el suelo. La masa de sedimentos vaporizados y la liberación de la corteza al medio ambiente después de un evento de impacto, incrementa con la disminución del ángulo de impacto.

El indicador más fiable de la dirección de la trayectoria de un bólido de impacto es el patrón asimétrico de material expulsado, pero debido a la erosión activa de la Tierra, estas zonas de acumulación de material rara vez se conservan alrededor de los cráteres de impacto terrestres. Por esto se ha buscado un indicador en la estructura del cráter para la oblicuidad del impacto.

Con todo esto concluimos que el ángulo que impactó en el cráter de Chicxulub es oblicuo de  $15^\circ$  a  $45^\circ$ , debido al material expulsado que desapareció en dirección del cuerpo que impacta.

La trayectoria del cráter de impacto de Chicxulub se estimó que fuera dirigido al noroeste NW, relacionado con los efectos ambientales y la distribución del material expulsado. También es relacionado con el desplazamiento de las estructuras centrales lejos de las excavaciones superficiales causadas por el impacto oblicuo y la interacción entre el anillo de pico, los cuales con base en análisis previos de pequeños cráteres de Venus, muestra que la posición del pico central no tiene relación con la dirección del impacto para impactos oblicuos. Un análisis posterior obtiene que el pico central de los cráteres en Venus, son esencialmente al azar con respecto a la dirección del impactador.

Una recomendación que hacemos es la utilización de métodos sísmicos regionales para cubrir la mayor extensión de la zona en el cráter de Chicxulub, con esto tener una mejor imagen estructural y así generar mejores modelos en conjunto para aumentar o eliminar posibles teorías en la explicación del impacto y de estructuras pre-existentes.

La propuesta relacionada para esta parte del estudio es la del análisis detallado de las posibles trayectorias de impacto para el meteorito de impacto, así como el de observar las diferentes técnicas realizadas y los resultados obtenidos en cada estudio antes realizado por otros autores, para tener un amplio panorama de las condiciones antes, durante y después del impacto.

Por lo tanto, el objetivo general y su correspondiente hipótesis para esta parte del estudio se concluyeron, demostrando las posibles direcciones y trayectorias del impacto, como ya se mencionó anteriormente. Así como el de los factores que modificaron las estructuras pre-existentes en la zona impactante, esto con la ayuda de cálculos y modelos realizados anteriormente, en los que se pudieron deducir estos resultados.

## Estructuras pre-existentes

Con base en los cálculos gravimétricos, la propuesta para las posibles relaciones que tienen las anomalías alrededor del cráter de impacto Chicxulub se concluyen en esta parte del estudio.

En el modelado gravimétrico se consideraron tres diferentes grupos de estructuras. Un primer grupo son los modelos tipo sutura y falla. El segundo grupo son los modelos tipo cuenca. El tercer grupo considera modelos híbridos tipo sutura cuenca.

La zona de sutura sugiere que sean dos unidades de diferente roca que están juntas debido al choque de dos paquetes litológicos, la parte de la falla de Ticul generada o reactivada por el desplazamiento de dos unidades de roca una sobre otra y el origen de la cuenca es debido a la falla geológica que permitió la sedimentación de carbonatos del Terciario.

Los estudios sísmicos comentados anteriormente, sugieren un modelo de cuenca en la zona noreste NE del cráter de Chicxulub representando por cuencas pre-existentes, con estos detalles pudimos asociar una zona de cuencas pre-existentes en la zona sur del cráter.

Se obtuvo un modelo gravimétrico que está relacionado con una zona de sutura, la cual tiene una estructura profunda, posteriormente se generó la falla geológica de Ticul que se pudo haber reactivado, la cual permitió el origen de una cuenca y que fue sepultada por la sedimentación. La estructura de la anomalía es asimétrica dada las pendientes que se observan a lo largo de los datos gravimétricos. La falta de un mapa geológico del lugar o de otros modelos geofísicos, dificulta la construcción de los modelos gravimétricos.

Las longitudes de onda obtenidos del Espectro de Potencia, revela la profundidad de las fuentes que provocan la anomalía, los cuales nos genera modelos relativamente profundos, aproximadamente del orden de los  $24.665 \pm 0.795$  kilómetros en la parte central.

Se realizaron modelos someros, sin embargo los rangos en las densidades, las frecuencias espaciales tan grandes y la geometría de las estructuras, es difícil asociarlas a modelos someros.

En conclusión, el modelo obtenido en este estudio de la zona de sutura, reactivada por una falla y que generó una cuenca, es aceptable. La forma alargada de la anomalía podría representar una zona de sutura con formación y desarrollo de una cuenca de depósito, lo que se refleja en los modelos gravimétricos. La relación con la falla de Ticul requiere de mayor análisis y estudios estructurales a detalle. Una posible relación, es que la falla represente una reactivación durante el periodo Terciario, y que la falla tenga una relación con la zona de sutura y la deformación debida al impacto.

Debido a que la anomalía en la zona sur esta considerablemente alejada de la zona de impacto, se descarta que haya sido generada por el impacto, aunque sí pudo haber sido modificada por el impacto.

Este trabajo es el primer estudio que se realiza para determinar la profundidad de las fuentes que provocan la anomalía en la zona sur del cráter de Chicxulub.

# **Índice Figuras y Tablas**

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.-</b> Correcciones de Gravedad. _____	30
<b>Figura 2.-</b> Representación oblicua en 3-D del mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer en el cráter de Chicxulub (Sharpton et al., 1993). _____	40
<b>Figura 3.-</b> Imagen satelital de interferometría de radar de alta resolución para el norte de la península de Yucatán. _____	41
<b>Figura 4.-</b> Gradiente de la gravedad horizontal calculado para la anomalía gravimétrica de Bouguer en el cráter Chicxulub (tomado del Connors et al., 1996). _____	43
<b>Figura 5.-</b> Mapa del contorno del campo de anomalía aeromagnética sobre el cráter de impacto Chicxulub, en el sector noroeste NW de la península de Yucatán. _____	44
<b>Figura 6.-</b> Modelos esquemáticos del cráter Chicxulub mostrando la configuración propuesta para la elevación central y la estructura del cráter profundo. _____	45
<b>Figura 7.-</b> Estructura profunda de Chicxulub de líneas compuestas dibujadas de perfiles de sísmica de reflexión no migradas Chicx-A y Chicx-A1 (tomadas de Morgan, Warner, 1999). _____	46
<b>Figura 8.-</b> Ubicación de las perforaciones en el norte de la península de Yucatán. _____	47
<b>Figura 9.-</b> Esquema de la columna del pozo Yaxcopoli-1, que muestra las divisiones litológicas principales. _____	49
<b>Figura 10.-</b> La imagen de la caja de núcleos del pozo Yaxcopoli-1, representa las secciones en los carbonatos Paleógenos, la secuencia de rocas impactadas y los carbonatos del Cretácico. _____	50
<b>Figura 11.-</b> Secuencia de brechas de impacto en el pozo Yaxcopoli-1. _____	52
<b>Figura 12.-</b> Imagen de la anomalía magnética sobre el cráter de Chicxulub en la plataforma de Yucatán (tomado del Rebolledo-Vieyra et al., 2010). _____	54
<b>Figura 13.-</b> El análisis estructural del cráter de Chicxulub, muestra la ubicación de las fallas en los dibujos interpretados para las líneas de Chicx-A y Chicx-A1 (tomados del Gulick et al., 2008). _____	56
<b>Figura 14.-</b> Los modelos magnéticos del cráter Chicxulub (tomado del Rebolledo-Vieyra et al., 2010). _____	57
<b>Figura 15.-</b> Modelo esquemático de los procesos de formación de cráteres en grandes estructuras de multi-anillo (Melosh, 1989; Gulick et al., 2008; Urrutia-Fucugauchi y Pérez-Cruz, 2009). _____	59
<b>Figura 16.- a)</b> Fotografías de cráteres lunares tomadas por el Apollo 13. _____	62
<b>Figura 17.-</b> Evolución de un cráter formado por el impacto de un proyectil de granito del tamaño de 1 kilómetro con velocidad de 6.5 km/s. _____	66
<b>Figura 18.-</b> Imágenes del cráter transitorio para un proyectil de 1 kilómetro de diámetro y una velocidad de 6.5 kms para diferentes ángulos de incidencia y la resistencia del objetivo. _____	68
<b>Figura 19.-</b> Última etapa de la formación del cráter causado por un proyectil de 1 kilómetro de diámetro a una velocidad de 6.5 kms hacia un objetivo. _____	69
<b>Figura 20.-</b> Imagen de las distancias aproximadas entre los pozos de perforación de diferentes compañías a los perfiles GH1, GH2 y GH3 _____	75
<b>Figura 21.-</b> Imagen del tendido de los perfiles GH1, GH2 y GH3, traslapados en la imagen del mapa base de la interferometría de radar de banda C, Shuttle Radar Topography Mission Tierra (Cortesía de NASA/JPL-Caltech). _____	83
<b>Figura 22.- Perfil GH1. (Superior)</b> Gráfica de los datos de la anomalía gravimétrica de Bouguer simple. _____	86
<b>Figura 23.- Perfil GH2. (Superior)</b> Gráfica de los datos de la anomalía gravimétrica de Bouguer simple. _____	87
<b>Figura 24.- Perfil GH3. (Superior)</b> Gráfica de los datos de la anomalía gravimétrica de Bouguer simple. _____	88

<b>Figura 25.-</b> Imagen de la gráfica de valores de gravedad observada y la anomalía gravimétrica de Bouguer del perfil GH1, traslapada con la imagen de la representación oblicua en 3-D del mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer en el cráter de Chicxulub (Sharpton et al., 1993).	89
<b>Figura 26.-</b> Imagen de la gráfica de valores de gravedad observada y la anomalía gravimétrica de Bouguer del perfil GH2, traslapada con la imagen del mapa base de la interferometría de radar de banda C, Shuttle Radar Topography Mission Tierra (Cortesía de NASA / JPL-Caltech).	90
<b>Figura 27.-</b> Imagen de la gráfica de valores de gravedad observada y la anomalía gravimétrica de Bouguer del perfil GH3, traslapada con la representación de anomalías gravimétricas de Bouguer en el cráter de Chicxulub (Lunar and Planetary Institute, en Houston).	91
<b>Figura 28.- Perfil GH1.</b> Imagen de las gráficas de las derivadas horizontales y verticales, así como de su segunda derivada vertical aplicadas a los valores de gravedad observada.	94
<b>Figura 29.- Perfil GH2.</b> Imagen de las gráficas de las derivadas horizontales y verticales, así como de su segunda derivada vertical aplicadas a los valores de gravedad observada.	94
<b>Figura 30.- Perfil GH3.</b> Imagen de las gráficas de las derivadas horizontales y verticales, así como de su segunda derivada vertical aplicadas a los valores de gravedad observada.	95
<b>Figura 31.- Perfil GH1.</b> Imagen de las gráficas de las continuaciones arriba y las continuaciones abajo aplicados a los valores de gravedad observada.	99
<b>Figura 32.- Perfil GH2.</b> Imagen de las gráficas de las continuaciones arriba y las continuaciones abajo aplicados a los valores de gravedad observada.	99
<b>Figura 33.- Perfil GH3.</b> Imagen de las gráficas de las continuaciones arriba y las continuaciones abajo aplicados a los valores de gravedad observada.	100
<b>Figura 34.- Perfil GH1.</b> Imagen de las gráficas del Perfil GH1 y del Perfil GH1 Interpolado.	104
<b>Figura 35.- Perfil GH2.</b> Imagen de las gráficas del Perfil GH2 y del Perfil GH2 Interpolado.	104
<b>Figura 36.- Perfil GH3.</b> Imagen de las gráficas del Perfil GH3 y del Perfil GH3 Interpolado.	105
<b>Figura 37.- Perfil GH1.</b> Gráfica del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda, con un espaciamiento de 1 kilómetro.	106
<b>Figura 38.- Perfil GH2.</b> Gráfica del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda, con un espaciamiento de 1 kilómetro.	106
<b>Figura 39.- Perfil GH3.</b> Gráfica del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda, con un espaciamiento de 1 kilómetro.	107
<b>Figura 40.-</b> Programa para calcular el Espectro de Potencia a partir de los valores de gravedad observada para el perfil GH1.	108
<b>Figura 41.- Perfil GH1.</b> Gráfica de la parte positiva del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda y de sus correspondientes pendientes.	109
<b>Figura 42.- Perfil GH2.</b> Gráfica de la parte positiva del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda y de sus correspondientes pendientes.	109
<b>Figura 43.- Perfil GH3.</b> Gráfica de la parte positiva del Espectro de Potencia en logaritmo natural en función de las Frecuencias Espaciales ó Números de Onda y de sus correspondientes pendientes.	110
<b>Figura 44.- Imagen de los perfiles.</b> Profundidades aproximadas de las fuentes principales obtenidas del cálculo de (Spector y Grant, 1970).	112
<b>Figura 45.-</b> Modelos representativo de la zona sur del cráter de Chicxulub. Se tienen 4 zonas importantes.	114
<b>Figura 46.-</b> Modelos representativo de la zona sur del cráter de Chicxulub. Se tienen 3 zonas importantes.	116
<b>Figura 47.-</b> Modelos representativo de la zona sur del cráter de Chicxulub. Se tienen 3 zonas importantes.	118
<b>Figura 48.-</b> Modelos representativo de la zona sur del cráter de Chicxulub. Se tienen 4 zonas importantes.	120

<b>Figura 49.-</b> Modelos representativo de la zona sur del cráter de Chicxulub. Se tienen 3 zonas importantes. ___	122
<b>Figura 50.-</b> Etapas de la formación dentro de la estratigrafía asimétrica pre-impacto. _____	126
<b>Figura 51.-</b> Los resultados de la modelación numérica. _____	128
<b>Figura 52.-</b> Ejemplo de la forma completa de la región fundida para el granito la línea continua, por debajo de los 3 kilómetros, la calcita es la línea semi-continua y la anhidrita en la línea de puntos, en la capa sedimentaria. _____	130
<b>Figura 53.-</b> Mediciones del offset del anillo de pico para el cráter Leyster en Venus. _____	132
<b>Figura 54.-</b> Evidencia de cuencas pre-existentes del Cretácico. _____	135

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Tabla 1.-</b> Densidad de Sedimentos y Rocas Sedimentarias. _____	34
<b>Tabla 2.-</b> Densidad de Minerales no metálicos y de varios productos. _____	34
<b>Tabla 3.-</b> Densidad de Minerales no metálicos y de varios productos. _____	35
<b>Tabla 4.-</b> Resultados de modelos en 3D: efectos de resolución (todos los cálculos son hidrodinámicos y verticales). _____	67
<b>Tabla 5.</b> Densidad de Sedimentos y Rocas Sedimentarias. _____	73
<b>Tabla 6.</b> Densidad de Minerales no metálicos y de varios productos. _____	73
<b>Tabla 7.-</b> Muestra las distancias aproximadas entre los pozos perforados y los perfiles del estudio en la zona sur del cráter Chicxulub. _____	76
<b>Tabla 8.-</b> Datos obtenidos del perfil GH1 por la Corrección de Bouguer Simple. _____	84
<b>Tabla 9.-</b> Datos obtenidos del perfil GH2 por la Corrección Bouguer Simple. _____	85
<b>Tabla 10.-</b> Datos obtenidos del perfil GH3 por la Corrección Bouguer Simple. _____	86
<b>Tabla 11.- Perfil GH1.</b> Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para la 1ra. Derivada Horizontal, la 1ra. Derivada Vertical y la 2da. Derivada Vertical. _____	92
<b>Tabla 12.- Perfil GH2.</b> Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para la 1ra. Derivada Horizontal, la 1ra. Derivada Vertical y la 2da. _____	93
<b>Tabla 13.- Perfil GH3.</b> Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para la 1ra. Derivada Horizontal, la 1ra. Derivada Vertical y la 2da. _____	93
<b>Tabla 14.- Perfil GH1.</b> Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para las continuaciones arriba y las continuaciones abajo. _____	96
<b>Tabla 15.- Perfil GH2.</b> Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para las continuaciones arriba y las continuaciones abajo. _____	97
<b>Tabla 16.- Perfil GH3.</b> Datos obtenidos del procesamiento de los valores de gravedad observada para las continuaciones arriba y las continuaciones abajo. _____	98
<b>Tabla 17.- Perfil GH1.</b> Datos obtenidos de la interpolación de los valores de gravedad observada. _____	101
<b>Tabla 18.- Perfil GH2.</b> Datos obtenidos de la interpolación de los valores de gravedad observada. _____	102
<b>Tabla 19.- Perfil GH3.</b> Datos obtenidos de la interpolación de los valores de gravedad observada. _____	103
<b>Tabla 20.-</b> Pendientes calculadas a partir de las gráficas obtenidas del Espectro de Potencia. _____	110

# **Bibliografía**

**BIBLIOGRAFÍA**

- Alvarez, L. W., W. Alvarez, et al. (1980). "Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction." *Science* 208(4448): 1095-1108.
- Alvarez, W., J. Smith, et al. (1992). "Proximal impact deposits at the Cretaceous-Tertiary boundary in the Gulf of Mexico: A restudy of DSDP Leg 77 Sites 536 and 540." *Geology* 20(8): 697-700.
- Amsden, A. A., H. M. Ruppel, et al. (1980). SALE: a simplified ALE computer program for fluid flow at all speeds: Medium: X; Size: Pages: 105.
- Arenillas, I., J. A. Arz, et al. (2007). "Chicxulub impact event is Cretaceous/Paleogene boundary in age: New micropaleontological evidence." *Earth and Planetary Science Letters* 249(3-4): 241-257.
- Arz, J. A., L. Alegret, et al. (2004). "Foraminiferal biostratigraphy and paleoenvironmental reconstruction at the Yaxcopoil-1 drill hole, Chicxulub crater, Yucatán Peninsula." *Meteoritics & Planetary Science* 39(7): 1099-1111.
- Bourgeois, J., T. Hansen, et al. (1988). "A Tsunami Deposit at the Cretaceous-Tertiary Boundary in Texas." *Science* 241(4865): 567-570.
- Campos-Enriquez, J. O., H. F. Morales-Rodriguez, et al. (1998). "Gauss's theorem, mass deficiency at Chicxulub Crater (Yucatan, Mexico), and the extinction of the dinosaurs." *Geophysics* 63(5): 1585-1594.
- Canales I. (2010). "Análisis estructural-estratigráfico del cráter de Chicxulub a partir de datos sísmicos de reflexión." Tesis Ingeniería Geofísica, Facultad de Ingeniería, UNAM: 102.
- Claeys, P., W. Kiessling, et al. (2002). "Distribution of Chicxulub ejecta at the Cretaceous-Tertiary boundary." *Geological Society of America Special Papers* 356: 55-68.
- Collins, Urrutia-Fucugauchi, et al. (2008). "Dynamic modeling suggests terrace zone asymmetry in the Chicxulub crater is caused by target heterogeneity." *Revista: Earth and Planetary Science Letters*, Volumen 270, (Edición 3-4): Páginas 221-230.
- Connors, Hildebrand, et al. (1996). "Yucatán karst features and the size of Chicxulub crater." *Revista: Geophysical Journal International*, Volumen 127, (Edición 3): Páginas F11-F14.
- Chavez-Aguirre, Urrutia-Fucugauchi, et al. (2008). "Impact ejecta and carbonate sequence in the eastern sector of the Chicxulub crater." *Revista: Comptes Rendus Geoscience*, Volumen 340, (Edición 12): Páginas 801-810.
- Dence, M. R., R. A. F. Grieve, et al. (1977). "Terrestrial impact structures: principal characteristics and energy considerations." *Pergamon Press* 2(1): 247-275.
- Ekholm, A. G., H. J. Melosh, et al. (2001). "Crater features diagnostic of oblique impacts: The size and position of the central peak." *Geophys. Res. Lett.* 28(4): 623-626.
- El-Khadragy, A. A., M. H. Saad, et al. (2010). "Crustal Modeling of South Sitra Area, North Western Desert, Egypt Using Bouguer Gravity Data." *Geology Department, Faculty of Science, Zagazig University, Egypt.* 6(1): 22-37.
- Gault, D. E., J. A. Wedekind, et al. (1978). "Experimental studies of oblique impact." *Lunar Planet.* 9(1-2): 3843-3875.
- Gelinas, A., D. A. Kring, et al. (2004). "Osmium isotope constraints on the proportion of bolide component in Chicxulub impact melt rocks." *Meteoritics & Planetary Science* 39(6): 1003-1008.

- Goussev, Charters, et al. (2005). "Gravity signature of a buried detached megablock: an example from the Mackenzie Delta area." *Revista: SEG Technical Program Expanded Abstracts*, Volumen 24, (Edición 1): Páginas 647-650.
- Grajales-Nishimura, J. M., E. Cedillo-Pardo, et al. (2000). "Chicxulub impact: The origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields." *Geology* 28(4): 307-310.
- Grieve, R. A. F. (1977). "Cratering processes: as interpreted from the occurrence of impact melts." Pergamon Press 1(1–2): 791–814.
- Grieve, R. A. F. (1989). "Test of a geometric model for the modification stage of simple impact crater development." *Meteoritics & Planetary Science* 24(1–2): 83-88.
- Gulick, Urrutia-Fucugauchi, et al. (2008). "Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater." *Revista: Nature Geosci*, Volumen 1, (Edición 2): Páginas 131-135.
- Gulick, S. P. S., P. J. Barton, et al. (2008). "Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater." *Nature Geosci* 1(2): 131-135.
- Hildebrand, A. R., G. T. Penfield, et al. (1991). "Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico." *Geology* 19(9): 867-871.
- Hildebrand, A. R., M. Pilkington, et al. (1998). "Mapping Chicxulub crater structure with gravity and seismic reflection data." Geological Society, London, Special Publications 140(1): 155-176.
- Hinze, Urrutia-Fucugauchi, et al. (2005). "New standards for reducing gravity data: The North American gravity database." *Revista: Geophysics*, Volumen 70, (Edición 4): Páginas J25-J32.
- Holom D., Oldow J., et al. (2007). "Gravity reduction spreadsheet to calculate the Bouguer anomaly using standardized methods and constants." *Revista: Geosphere*, Volumen 3, (Edición 2): Páginas 86-90.
- Holsapple, K. A. (1993). "The scaling of impact processes in planetary sciences." *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 21(1): 333–373.
- Hurtado-Cardador, Urrutia-Fucugauchi, et al. (2006). "Data reduction and tying in regional gravity surveys—results from a new gravity base station network and the Bouguer gravity anomaly map for northeastern Mexico." *Revista: Institute of Physics*, Volumen 3, (Edición 4): Páginas 329-337.
- Ivanov, B. (2005). "Numerical Modeling of the Largest Terrestrial Meteorite Craters." *Solar System Research* 39(5): 381-409.
- Ivanov, B. A., D. Deniem, et al. (1997). "Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering." *International Journal of Impact Engineering* 20(1–5): 411-430.
- Izett G.A. (1990). "The Cretaceous/Tertiary boundary interval, Raton Basin, Colorado and New Mexico, and its content of shock-metamorphosed minerals: Evidence relevant to the K/T boundary impact-extinction theory." *Geol. Soc. Am. Sp. Pap.* 249(1): 1-100.
- Kamo, S. L. and T. E. Krogh (1995). "Chicxulub crater source for shocked zircon crystals from the Cretaceous-Tertiary boundary layer, Saskatchewan: Evidence from new U-Pb data." *Geology* 23(3): 281-284.
- Keller, G., S. Abramovich, et al. (2009). "Biotic effects of the Chicxulub impact, K–T catastrophe and sea level change in Texas." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 271(1–2): 52-68.

- Keller G., Adatte T., et al. (2004). "Chicxulub impact predates the K-T boundary mass extinction." *Proceed. Nat. Acad. Sci.* 101: 3753-3758.
- López Ramos, E. (1975). "Geological summary of the Yucatan peninsula." In: Nairn, A.E.M., Stehli, F.G. (Eds.), *The Ocean Basins and Margins, The Gulf of Mexico and the Caribbean*. 3(1): 257-282.
- Martelet, Calcagno, et al. (2004). "Integrated 3D geophysical and geological modelling of the Hercynian Suture Zone in the Champtoceaux area (south Brittany, France)." *Revista: Tectonophysics*, Volumen 382, (Edición 1-2): Páginas 117-128.
- McDonald, Melosh, et al. (2008). "Oblique impacts and peak ring position: Venus and Chicxulub." *Revista: Geophysical Research Letters*, Volumen 35, (Edición 7): Páginas L07203.
- Melosh, H. J. (1989). "Impact Cratering: A Geologic Process." *Oxford University Press* 1(1-2): 245.
- Meyerhoff A.A., Lyons J.B., et al. (1994). "Chicxulub structure: A volcanic sequence of Late Cretaceous age." *Geology* 22(1): 3-4.
- Morgan, Lana, et al. (2006). "Analyses of shocked quartz at the global K-P boundary indicate an origin from a single, high-angle, oblique impact at Chicxulub." *Revista: Earth and Planetary Science Letters*, Volumen 251, (Edición 3-4): Páginas 264-279.
- Morgan, J., M. Warner, et al. (1997). "Size and morphology of the Chicxulub impact crater." *Nature* 390(6659): 472-476.
- Morgan, J., M. Warner, et al. (1999). "Chicxulub: The third dimension of a multi-ring impact basin." *Geology* 27(5): 407-410.
- Morgan, J. V., M. R. Warner, et al. (2011). "Full waveform tomographic images of the peak ring at the Chicxulub impact crater." *J. Geophys. Res.* 116(B6): B06303.
- Nyblade A., Pollack H., et al. (1992). "A gravity model for the lithosphere in western Kenya and northeastern Tanzania." *Revista: Tectonophysics*, Volumen 212, (Edición 3-4): Páginas 257-267.
- Ortiz-Alemán, Urrutia-Fucugauchi, et al. (2010). "Aeromagnetic anomaly modeling of central zone structure and magnetic sources in the Chicxulub crater." *Revista: Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Volumen 179, (Edición 3-4): Páginas 127-138.
- Ortiz Alemán, C., J. Fucugauchi Urrutia, et al. (2002). *Investigaciones geofísicas sobre cráteres de impacto y el cráter de Chicxulub (Yucatán, México)*, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Penfield, G. T., Camargo-zanoguera, et al. (1981). "Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetism and gravity. En: *Technical Program, Abstracts and Bibliographies, 51st Annual Meeting*." *Society of exploration Geophysicists*: 37.
- Pierazzo, Melosh, et al. (1999). "Hydrocode modeling of Chicxulub as an oblique impact event." *Revista: Earth and Planetary Science Letters*, Volumen 165, (Edición 2): Páginas 163-176.
- Pike, R. J. (1974). "Depth/diameter relations of fresh lunar craters: Revision from spacecraft data." *Geophys. Res. Lett.* 1(7): 291-294.
- Pilkington, M., A. R. Hildebrand, et al. (1994). "Gravity and magnetic field modeling and structure of the Chicxulub Crater, Mexico." *J. Geophys. Res.* 99(E6): 13147-13162.

- Poelchau, Kenkmann, et al. (2009). "Rim uplift and crater shape in Meteor Crater: Effects of target heterogeneities and trajectory obliquity." *Revista: Geophysical Research*, Volumen 114, (Edición E1): Páginas E01006.
- Ponce D., Hildenbrand T., et al. (2003). "Gravity and Magnetic Expression of the San Leandro Gabbro with Implications for the Geometry and Evolution of the Hayward Fault Zone, Northern California." *Revista: Bulletin of the Seismological Society of America*, Volumen 93, (Edición 1): Páginas 14-26.
- Pope K., Ocampo A.C., et al. (2005). "Chicxulub impact ejecta deposits in southern Quintana Roo, Mexico, and central Belize." *Geol. Soc. Am. Sp. Pap.* 384: 171–190.
- Poveda, A. and F. Espejo (2007). *El cráter de Chicxulub y la extinción de los dinosaurios hace sesenta y cinco millones de años.* México, Gobierno del Estado de Yucatán.
- Rebolledo-Vieyra, Urrutia-Fucugauchi, et al. (2010). "Aeromagnetic anomalies and structural model of the Chicxulub multiring impact crater, Yucatan, Mexico." *Revista: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Volumen 27, (Edición 1): Páginas 185-195.
- Salguero E., Urrutia-Fucugauchi J., et al. (2010). "Fracturing and deformation in the Chicxulub crater – Complex trace analysis of instantaneous seismic attributes." *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 27: 175-184.
- Scherler, D., T. Kenkmann, et al. (2006). "Structural record of an oblique impact." *Earth and Planetary Science Letters* 248(1–2): 43-53.
- Schulte, P., L. Alegret, et al. (2010). "The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary." *Science* 327(5970): 1214-1218.
- Schultz P. H., Anderson R. R., et al. (1996). Asymmetry of the Manson impact structure: Evidence for impact angle and direction, *Geol. Soc. Am. Spec.:* 397–417.
- Schultz, P. H., S. D'Hondt, et al. (1996). "Cretaceous-Tertiary (Chicxulub) impact angle and its consequences." *Geology* 24(11): 963-967.
- Sharpton, V. L., Brent D. G., et al. (1992). "New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary." *Nature* 359(6398): 819-821.
- Sheriff, R. E. (2002). *Encyclopedic dictionary of applied geophysics*, Society of Exploration Geophysicists.
- Snyder, D. B., R. W. Hobbs, et al. (1999). "Deep seismic reflection profiles across the Chicxulub Crater." *Geological Society of America Special Papers* 339: 263-268.
- Stöffler, D., N. A. Artemieva, et al. (2004). "Origin and emplacement of the impact formations at Chicxulub, Mexico, as revealed by the ICDP deep drilling at Yaxcopoil-1 and by numerical modeling." *Meteoritics & Planetary Science* 39(7): 1035-1067.
- Stöffler, D., N. A. Artemieva, et al. (2002). "Modeling the Ries-Steinheim impact event and the formation of the moldavite strewn field." *Meteoritics & Planetary Science* 37(12): 1893-1907.
- Swisher III C.C., Grajales-Nishimura J.M., et al. (1992). "Chicxulub crater melt-rock and K–T boundary tektites from Mexico and Haiti yield." *Science* 257(1): 954–958.
- Telford, W. M., L. P. Geldart, et al. "Applied Geophysics (2nd Edition)". Cambridge University Press.

- Tsikalas, F. (2005). Mjølner Crater as a Result of Oblique Impact: Asymmetry Evidence Constrains Impact Direction and Angle Impact Tectonics. C. Koeberl and H. Henkel, Springer Berlin Heidelberg: 285-306.
- Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera, et al. (2011). "The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico." *Revista: Geofísica Internacional*, Volumen 50, (Edición 1): Páginas 99-127.
- Urrutia-Fucugauchi, Camargo-Zanoguera, et al. (2010). "The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico." *Geofísica Internacional* 50-1: 99-127.
- Urrutia-Fucugauchi, L. Marin, et al. (1994). "Reverse polarity magnetized melt rocks from the cretaceous/tertiary chicxulub structure, Yucatan peninsula, Mexico." *Tectonophysics* 237(1-2): 105-112.
- Urrutia-Fucugauchi, J. Morgan, et al. (2004). "The Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP)." *Meteoritics & Planetary Science* 39(6): 787-790.
- Urrutia-Fucugauchi, Perez-Cruz, et al. (2009). "Multiring-forming large bolide impacts and evolution of planetary surfaces." *International Geology Review* 51(12): 1079-1102.
- Urrutia-Fucugauchi, J. (1993). "Tektite-bearing deep-water clastic unit at the Cretaceous/Tertiary boundary in NE Mexico-Comments." *Geology* 21: 109-191.
- Velasco-Villareal, M., J. Urrutia-Fucugauchi, et al. (2011). "Paleomagnetism of impact breccias from the Chicxulub crater – Implications for ejecta emplacement and hydrothermal processes." *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 186(3-4): 154-171.
- Vermeesch, Morgan, et al. (2008). "Structural uplift beneath the Chicxulub impact structure." *Revista: Geophysical Research*, Volumen 113, (Edición B7): Páginas B07103.
- Vermeesch, P. M., J. V. Morgan, et al. (2004). "Chicxulub central crater structure: Initial results from physical property measurements and combined velocity and gravity modeling." *Meteoritics & Planetary Science* 39(7): 1019-1034.
- Ward, W. C., G. Keller, et al. (1995). "Yucatán subsurface stratigraphy: Implications and constraints for the Chicxulub impact." *Geology* 23(10): 873-876.
- WinGLink GeoSystem, S. (2008). "A guide to using WinGLink." *Manual para el usuario*, Volumen 1, (Edición WinGLink®): Páginas 473.
- Wünnemann, Elbeshausen, et al. (2009). "Scaling of oblique impacts in frictional targets: Implications for crater size and formation mechanisms." *Revista: Icarus*, Volumen 204, (Edición 2): Páginas 716-731.
- Wünnemann, K., G. S. Collins, et al. (2006). "A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets." *Icarus* 180(2): 514-527.
- Zürcher, L., D. A. Kring, et al. (2004). "Hydrothermal alteration in the core of the Yaxcopoil-1 borehole, Chicxulub impact structure, Mexico." *Meteoritics & Planetary Science* 39(7): 1199-1221.