



---

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

### ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO DE SECUENCIAS Y NÚCLEOS DE PERFORACIÓN PARA EL AMARRE DE SECCIONES SÍSMICAS A PROFUNDIDAD: CASO CHICXULUB

# T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

## IVÁN CIRILO HERNÁNDEZ SANCÉN

DIRECTOR: DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI



MÉXICO D.F., CD. UNIVERSITARIA

2011

*"Realmente soy un soñador práctico;  
mis sueños no son bagatelas en el aire.  
Lo que yo quiero es convertir mis sueños en realidad."*

*-Mahatma Gandhi-*

# AGRADECIMIENTOS

---

---

Un profundo agradecimiento a mi madre y a mi padre, los pilares de mi vida, por el cariño más sincero que pueda existir; por brindarme su apoyo y alentarme a cumplir mis objetivos; por forjar en mí lo que soy como persona.

A mis hermanos, porque a pesar de todo, siempre he contado con su apoyo y han seguido y siguen mis pasos.

A mis amigos, a quienes sobraría nombrar por el simple hecho de sentir que lo somos, por todas las experiencias y sueños que compartimos; por vivir estos años que siempre extrañaré, juntos.

Al Dr. Jaime Urrutia, por el apoyo en la realización de este trabajo, por su tiempo y dedicación, y sobre todo por brindarme sus conocimientos y permitirme ser parte de su legado.

A mi alma mater, mi querida UNAM, por mi formación académica y por abrirme las puertas de mi futuro; porque siempre estaré orgulloso de haber sido Universitario.

A mi guía, por traerme hasta aquí, e indicarme el camino a seguir.

Muchas Gracias.

# ÍNDICE

---

---

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2. EL CRÁTER CHICXULUB</b> .....	<b>6</b>
2.1 LA PLATAFORMA CARBONATADA DE YUCATÁN .....	6
2.1.1 Aspectos Generales .....	6
2.1.2 Geología General .....	7
2.2 CRÁTER CHICXULUB .....	9
2.3 ESTUDIOS PREVIOS .....	11
2.3.1 Estudios Gravimétricos y Magnetométricos .....	11
2.3.2 Estudios Sísmicos de Reflexión .....	13
2.3.3 Perforación de Pozos y Análisis de Núcleos .....	14
<b>3. MÉTODOS</b> .....	<b>15</b>
3.1 ESTUDIO SÍSMICO DE REFLEXIÓN .....	15
3.1.1 Trabajo de campo .....	17
3.1.2 Adquisición .....	19
3.1.2.1 Campaña de 1996 .....	19
3.1.3 Procesamiento .....	21
3.2 ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA DE SECUENCIAS .....	25
<b>4. EL POZO YAXCOPOIL-1</b> .....	<b>28</b>
4.1 COLUMNA LITOLÓGICA (1511M - 775M) .....	29
4.2 COLUMNA LITOSTRATIGRÁFICA (792M - 404M) .....	31

4.3 REGISTROS DE PROPIEDADES PETROFÍSICAS .....	34
4.3.1 Densidad.....	34
4.3.2 Velocidad de Onda P (Vp) .....	38
<b>5. ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO DE SECUENCIAS .....</b>	<b>41</b>
5.1 INTERPRETACIÓN DE DATOS SÍSMICOS .....	41
5.1.1 Marcado de Secciones.....	41
5.2 INTEGRACIÓN DE DATOS DE POZO .....	42
5.3 INTERPRETACIÓN DE SECCIONES SÍSMICAS.....	44
5.3.1 Sección Sísmica Chicx-A.....	45
5.3.2 Sección Sísmica Chicx-A1 .....	48
5.3.3 Sección Sísmica Chicx-B.....	51
5.3.4 Sección Sísmica Chicx-C.....	54
<b>6. ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDADES .....</b>	<b>57</b>
6.1 PRIMERA APROXIMACIÓN .....	57
6.1.1 Sección Sísmica Chicx-A.....	59
6.1.2 Sección Sísmica Chicx-A1 .....	59
6.1.3 Sección Sísmica Chicx-B.....	61
6.1.4 Sección Sísmica Chicx-C.....	62
6.2 SEGUNDA APROXIMACIÓN .....	63
6.2.1 Sección Sísmica Chicx-A.....	64
6.2.2 Sección Sísmica Chicx-A1 .....	65
6.2.3 Sección Sísmica Chicx-B.....	66
6.2.4 Sección Sísmica Chicx-C.....	67
<b>7. DISCUSIÓN .....</b>	<b>68</b>
CONTACTO BRECHAS DE IMPACTO Y CARBONATOS DEL PALEÓGENO .....	69

CORRELACIÓN DE REGISTROS DE PROPIEDADES PETROFÍSICAS .....	70
MODELOS DE VELOCIDADES.....	74
7.1 AMARRE SECCIÓN SÍSMICA CHICX-A.....	75
7.2 AMARRE SECCIÓN SÍSMICA CHICX-A1.....	80
7.3 AMARRE SECCIÓN SÍSMICA CHICX-B.....	83
7.4 AMARRE SECCIÓN SÍSMICA CHICX-C.....	86
MORFOLOGÍA DEL CRÁTER Y ASIMETRÍA .....	90
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>95</b>

# RESUMEN

---

---

El cráter de impacto Chicxulub, en la península de Yucatán, es de gran interés para la comunidad científica, debido a su relación con la extinción masiva de especies a finales del periodo Cretácico. Se ha estudiado a través de diversos métodos geofísicos, perforación de pozos, recuperación continua de núcleos y adquisición de datos sísmicos marinos.

En este estudio se analizan e interpretan los datos sísmicos marinos de las secciones Chicx-A, A1, B y C, adquiridas en la plataforma carbonatada de Yucatán, las cuales cruzan la estructura de impacto Chicxulub. Se analizan además los datos del pozo Yaxcopoil-1, que es uno de los pozos exploratorios de los programas de perforación que han incluido recuperación continua de núcleos, el cual se ubica en el suroeste del cráter, a 60 km del centro.

Para los estudios de sismica de Chicxulub, no se dispone de pozos en el sector marino del cráter, por lo que en este estudio se analizan alternativas para la interpretación y amarre de los datos a profundidad.

Entre los objetivos del trabajo se tiene realizar el análisis estratigráfico de las secciones sísmicas para identificar los reflectores sísmicos de mayor energía, y a través del análisis de los núcleos de perforación, definir el amarre de las secciones sísmicas migradas en tiempo.

Las profundidades en las secciones sísmicas pueden estimarse por medio de la migración a profundidad, lo que requiere de un modelo de velocidades. La disponibilidad de modelos de velocidad con alta resolución y precisión es una de las limitantes principales para los procesos de conversión tiempo-profundidad en las secciones sísmicas y por lo tanto, para el amarre entre la información sísmica y los datos de pozo. Tal amarre se refiere a una correspondencia entre las profundidades de cada uno de los niveles geológicos tras la conversión del tiempo de viaje a profundidad y las mediciones realizadas directamente en los pozos.

En este estudio se emplean algunas opciones para estimar las profundidades de horizontes sísmicos y evaluar su posible utilidad para el amarre de las secciones sísmicas. El horizonte mejor definido es el correspondiente al contacto carbonatos-brechas de impacto y que define la estructura de cuenca formada por el cráter; el contacto es muestreado en el pozo exploratorio Yaxcopoil-1 a una profundidad aproximada de 795 metros. Este horizonte presenta reflectores energéticos que pueden observarse en las secciones, caracterizados por continuidad lateral, y que definen una topografía irregular siguiendo las estructuras del anillo de picos y la forma de la cuenca.

A través del amarre de las secciones sísmicas, se obtienen las profundidades de los horizontes sísmicos que representan cambios litológicos dentro de la secuencia carbonatada del Paleógeno, a partir de lo cual, es posible analizar factores globales y regionales relacionados con el desarrollo de las secuencias, como cambios en el nivel del mar y ambientes de depósito.

Por medio del análisis de las secuencias, se observa que los reflectores sísmicos profundizan hacia la región oriental del cráter, particularmente en el sector noreste, lo cual es visible también en las diferencias de las profundidades de los horizontes a través del amarre de las secciones. El buzamiento de los reflectores a lo largo de las secciones, delimita la estructura del anillo de picos central en el cráter (peak ring), definiendo las depresiones anulares y la cuenca central.

Estas observaciones concuerdan con las propuestas en estudios previos, acerca de la asimetría y tipo de cráter. Los datos de los perfiles de sísmica indican que Chicxulub tiene una morfología multianillo, con una estructura central de tipo peak ring y asimetrías en las estructuras y componentes del cráter.



# 1. INTRODUCCIÓN

---

---

El cráter de impacto Chicxulub, localizado en la península de Yucatán, ha venido representando un punto de gran interés para la comunidad científica, ya que actualmente es el cráter mejor conservado y de mayor tamaño existente en el planeta, pero sobre todo por su relación con el evento que dio origen a la extinción masiva de especies a finales del periodo Cretácico.

El cráter se ha estudiado a través de métodos geofísicos como la gravimetría, magnetometría y con la perforación de pozos y recuperación continua de núcleos, así como diversas campañas de adquisición de datos sísmicos marinos, todas ellas con el objetivo de conocer la estructura del cráter y hacer una correlación estratigráfica y litológica de los materiales presentes.

Las correlaciones estratigráficas están sujetas a un amarre de la información sísmica convertida a profundidad y las profundidades de los diferentes niveles geológicos registrados en los pozos profundos; tal amarre se refiere a una correspondencia entre las profundidades de cada uno de los niveles geológicos obtenidas a través de la conversión del tiempo de viaje a profundidad y las mediciones hechas directamente en pozo.

La disponibilidad de modelos de velocidad con alta resolución y precisión es una de las limitantes principales para los procesos de conversión tiempo-profundidad en las secciones sísmicas. Los modelos de velocidades pueden obtenerse a través de información de registros de pozo y estudios de perfil sísmico vertical (VSP), sin embargo en muchos casos no se dispone de pozos en las zonas de interés. Estimaciones de velocidades pueden derivarse del análisis NMO en las secciones, sin embargo varios factores pueden limitar la precisión de las determinaciones, tales como los efectos de la anisotropía, que modifican las velocidades.

La conversión tiempo-profundidad para la migración a profundidad es importante para el análisis e interpretación de datos sísmicos en secciones con cambios de velocidad lateral marcados, los cuales no son representados en las secciones en tiempo. Por ejemplo, en secciones sísmicas

con fuertes cambios laterales, se puede incluso estimar direcciones de buzamiento invertidas para los horizontes en medios estratificados plegados.

Al establecer un modelo de velocidades, a través del cual se conviertan los tiempos de viaje a profundidad, estableciendo las profundidades de contactos litológicos u estructuras en el medio, es necesario respaldar estas estimaciones a través de datos adquiridos en los pozos perforados, definiendo así el amarre de datos. Es por esto que el análisis estratigráfico de las secuencias y el de núcleos de perforación, resultan buenas herramientas para definir tal amarre.

A través de la estratigrafía sísmica de secuencias, se identifican los reflectores sísmicos de mayor energía en la sección perteneciente al periodo Terciario, que de acuerdo a la teoría implican contrastes fuertes de impedancia acústica, lo cual puede estar referido a un cambio de litologías en el medio.

El área de estudio facilita el análisis, debido a las características estratigráficas de la plataforma carbonatada de Yucatán, principalmente en lo que corresponde al Terciario en el cráter Chicxulub, al presentarse una estratificación horizontal mayormente uniforme, por lo que resulta sencillo identificar y seguir los reflectores sísmicos, marcando las secciones.

Por otro lado, a través del análisis de los núcleos de perforación, se obtienen registros de sus propiedades petrofísicas, a partir de los cuales es posible observar variaciones, que puedan indicar contrastes en las propiedades del medio. Además el emplear esta herramienta, resulta muy atractivo, ya que la recuperación continua de núcleos de perforación tiene una aplicación restringida, debido a que no se tiene acceso fácilmente a este tipo de material en cualquier empresa dedicada a la perforación, ya que resulta en altos costos de operación debido al tiempo invertido, lo que representa gastos elevados para cualquier compañía en la industria.

Un amarre entre las secciones sísmicas y los datos de pozo permite estimar profundidades de horizontes y reflectores de interés, correlacionar secciones y pozos, análisis estratigráfico de secuencias y proporciona una caracterización estructural y estratigráfica del subsuelo más precisa,

proporcionando diversos beneficios como caracterizaciones de yacimientos adecuadas y cálculo de reservas de hidrocarburos, entre otras.

La información sísmica debe ligarse a la información estratigráfica y litológica obtenida de los núcleos recuperados y mediciones hechas directamente en pozo, con la finalidad de realizar una mejor interpretación de las secciones. Las perforaciones se han llevado a cabo en diversos puntos del estado de Yucatán, obteniéndose con esto información de la región terrestre del cráter, mientras que en la región marina, a la fecha no se ha llevado a cabo ninguna perforación, por lo cual es necesario proyectar los pozos hacia las líneas sísmicas marinas, bajo la consideración de un cráter circular y simétrico.

En este estudio se analizan e interpretan datos sísmicos marinos de las secciones sísmicas Chicx-A, A1, B y C, tomadas en la plataforma carbonatada de Yucatán y que cruzan la estructura de impacto Chicxulub. En el estudio se analizan también los datos de uno de los pozos exploratorios de los programas de perforación en Chicxulub, que han incluido recuperación continua de núcleos. El pozo analizado es el Yaxcopoil-1, el cual se perforó en el suroeste del cráter Chicxulub.

El objetivo es realizar el análisis estratigráfico de las secciones sísmicas Chicx-A, A1, B y C, así como el análisis de los registros de propiedades petrofísicas de los núcleos de perforación correspondientes al pozo Yaxcopoil-1, con la finalidad de definir el amarre de las secciones sísmicas migradas en tiempo, para las profundidades estimadas a partir de los modelos de velocidades seleccionados.

Por otro lado, a través del amarre de las secciones sísmicas a profundidad, es posible hacer comparaciones entre los resultados obtenidos para cada sección, con la finalidad de determinar características estratigráficas y estructurales del cráter de impacto y su asimetría.

## 2. EL CRÁTER CHICXULUB

---

### 2.1 La Plataforma Carbonatada de Yucatán

#### 2.1.1 Aspectos Generales

La península de Yucatán se localiza entre los 16° y 22° de latitud norte y 86° a 91° de longitud oeste del meridiano de Greenwich; cuenta con una extensión de 300000 km<sup>2</sup> y separa al mar Caribe del Golfo de México; abarca territorio mexicano, el Petén guatemalteco y el norte de Belice (Fig. 2.1).



Fig. 2.1 Localización de la Península de Yucatán.

Su formación se debe a depósitos marinos que posteriormente emergieron; carece de drenaje superficial debido a que en su mayoría está formada por material calcáreo, por lo cual el agua se filtra, dando la formación de cenotes y grutas subterráneas.

Un 90% de su superficie está por debajo de los 200 metros sobre el nivel del mar, siendo la sierra de Ticul la única elevación prominente. Topográficamente se divide en Planicie Norte, Sierra de Ticul y Planicie Sur.

### **2.1.2 Geología General**

El Bloque Yucatán es un bloque tectónico único, sin plegamientos, del Paleozoico, cuyo límite está dado por la falla Motagua. Este basamento metamórfico de origen pangéico continental se separa del Bloque Louisiana-Texas al momento de la apertura del Golfo de México; su posición actual viene desde fines del Triásico (~ 200 millones de años). Sobre este basamento se acumuló una capa gruesa de sedimentos marinos del Paleozoico Tardío, seguido por sedimentación continental en el Jurásico, que a su vez subyacen a un depósito extenso de evaporitas, que corresponden a una cuenca carbonatada limitada por arrecifes del Cretácico Temprano.

Sobre éstas se encuentran calizas depositadas en la plataforma durante el Cretácico Tardío; la frontera entre el Cretácico y el Terciario presenta la estructura de impacto Chicxulub. La plataforma de Yucatán, conformada por calizas de periodos del Cretácico (144 a 165 millones de años) al Cenozoico-Cuaternario (65 millones de años al reciente), refleja un gradiente temporal en sentido norte-sur, lo cual indica una emergencia paulatina de la plataforma durante el Plioceno (5.2 a 1.8 millones de años). Esta emergencia paulatina explica la asimetría, que se extiende solamente unos 10 km en el margen del Caribe y hasta 200 km del lado del Golfo de México.

El tercio norte y la mitad oriental de la península están formados por karst, con elevación máxima de 10 m, compuesta por secuencias de capas horizontales de calizas y dolomías del Terciario Tardío (Plioceno) de la formación Carrillo Puerto, limitada por los depósitos periféricos del Cuaternario. La formación Carrillo Puerto tiene un espesor de entre 163 y 240 m.

Los depósitos del Cuaternario están restringidos a una franja periférica angosta a lo largo de la costa norte; en la costa noreste los depósitos del Cuaternario son del Pleistoceno y su extensión y topografía se interpretan como carbonatos supramareales, que reflejan los movimientos de la línea de costa.

La Plataforma tiene como basamento un complejo cristalino-volcánico del Neo proterozoico hasta el Paleozoico tardío oculto bajo la cobertura sedimentaria del Mesozoico (Jurásico-Cretácico) y del Cenozoico. Las rocas sedimentarias más antiguas identificadas en esta provincia ocurren también ocultas bajo rocas más jóvenes del Cretácico y Cenozoico y que por correlación regional con unidades semejantes del SE de México (Formación Todos Santos) se les asigna una edad del Jurásico Medio-Tardío.

De manera discordante sobre estas rocas continentales reposa una secuencia gruesa de carbonatos y evaporitas del Cretácico, interrumpida abruptamente por los depósitos del límite Cretácico-Terciario asociados con el impacto de Chicxulub. Los carbonatos por lo general están fuertemente dolomitizados. El Cuaternario igualmente está representado por carbonatos aunque carente de evaporitas (Fig. 2.2).

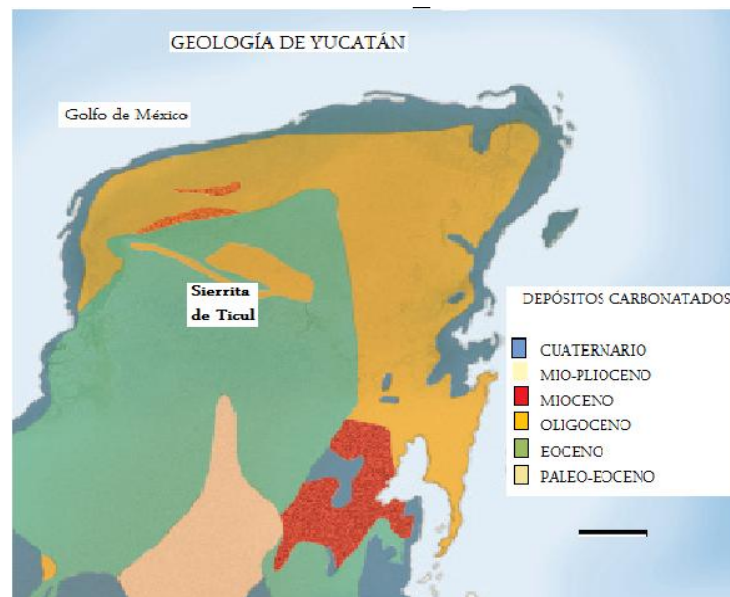


Fig. 2.2 Geología superficial de los carbonatos en Yucatán.

Las formaciones representativas de las secuencias que están expuestas en la superficie son las siguientes: Icaiche (Eoceno medio temprano y Paleoceno), Piste y Chichen Itzá (Eoceno medio y tardío), Bacalar (Mioceno) y Carrillo Puerto (Mioceno-Plioceno).

Las formaciones del Oligoceno (calizas, lutitas y margas), así como las del Cuaternario no tienen nombres formales. Por información de pozos y afloramientos, los espesores medidos para estos grupos de estratos es variable entre 1,000 y 3,000 m.

Hacia el sur existen grandes estructuras de compresión miocénica como el Arco de la Libertad que forma el límite norte del Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas o bien la cuenca deltaica de Tabasco. Por otra parte, la ubicación de esta provincia en la periferia del Golfo de México implica que durante el Jurásico sufrió una intensa deformación tensional dando origen a fallas y grabens en los que se depositaron sedimentos.

Las únicas fallas visibles en la superficie de esta provincia son la Falla de Ticul en la región norte-central de la plataforma y dirección W-NW (110 km), y el sistema de fallas de Río Hondo-Catoche (140 km) con una orientación E-NE.

## **2.2 Cráter Chicxulub**

El Cráter Chicxulub es una estructura formada por el impacto de un meteorito hace 65 Ma, el cual se asocia con uno de los eventos geológicos más importantes en el Fanerozoico, que produjo la extinción masiva del 75% de las especies, incluidos los dinosaurios; marca la transición del Mesozoico al Cenozoico a través del llamado Límite K/T.

El cráter Chicxulub se encuentra enterrado por debajo de sedimentos carbonatados en el norte de la península de Yucatán, con centro en el poblado de Chicxulub Puerto y un diámetro aproximado de 240 km (Fig. 2.3).



Fig. 2.3 Localización del Cráter Chicxulub en la Península de Yucatán. Imagen base modificada de Google Earth, 2011.

Se ha realizado una gran cantidad de estudios de exploración geofísica, geológica y perforación de pozos, con lo que se ha demostrado su presencia y geometría, siendo de las características más importantes su anillo central o peak ring [Hildebrand et al., 1991], además gracias a los análisis geocronológicos y paleomagnéticos de las rocas que lo conforman se ha podido corroborar su edad [Sharpton et al., 1992; Urrutia-Fucugauchi et al., 1994].

También se han realizado estudios aéreos y marinos, proyectos de perforación y análisis de laboratorio con las muestras obtenidas y modelados. Parte de estos estudios los inició Pemex en un programa de exploración petrolera y más recientemente fueron realizados por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) dentro de sus proyectos geofísicos y de perforación.

Los estudios del cráter Chicxulub presentan una gran oportunidad para descubrir nueva información, como las consecuencias globales en el ambiente, en el clima y su participación en la evolución geológica y biológica.



## **2.3 Estudios Previos**

Los estudios sobre el impacto Chicxulub tienen sus antecedentes a partir de los descubrimientos realizados por Álvarez y colaboradores en 1980, en torno a una delgada capa de arcilla intercalada en la formación de carbonatos, que marca la frontera entre el Cretácico y el Terciario conocida como límite K-T.

En principio el objetivo del estudio de las secuencias K/T y la capa de la frontera era estimar su tasa de sedimentación, para ello se midió el contenido de iridio, elemento poco común en rocas terrestres pero abundante en material cósmico, se encontró que la acumulación no había sido gradual, lo que hizo pensar que se trató de un evento de corta duración proveniente del exterior, el que formó este marcador geológico. El cráter cobró un gran interés científico y comenzaron una serie de proyectos para su estudio, los cuales en su mayoría los ha realizado la Universidad Nacional Autónoma de México.

### **2.3.1 Estudios Gravimétricos y Magnetométricos**

La estructura del cráter fue inicialmente investigada por los trabajos de exploración de Petróleos Mexicanos a partir de los años 40s. Los trabajos exploratorios documentaron una anomalía gravimétrica con patrones semi-circulares concéntricos (Fig. 2.4 y 2.5), que fue asociada a un cráter volcánico o bien a un cráter de impacto (Penfield y Camargo, 1981).

Los estudios gravimétricos y magnetométricos llevados a cabo por programas universitarios internacionales, en particular por parte de la UNAM, han determinado un cráter de tipo multianillo, indicándose el número de anillos que lo conforma

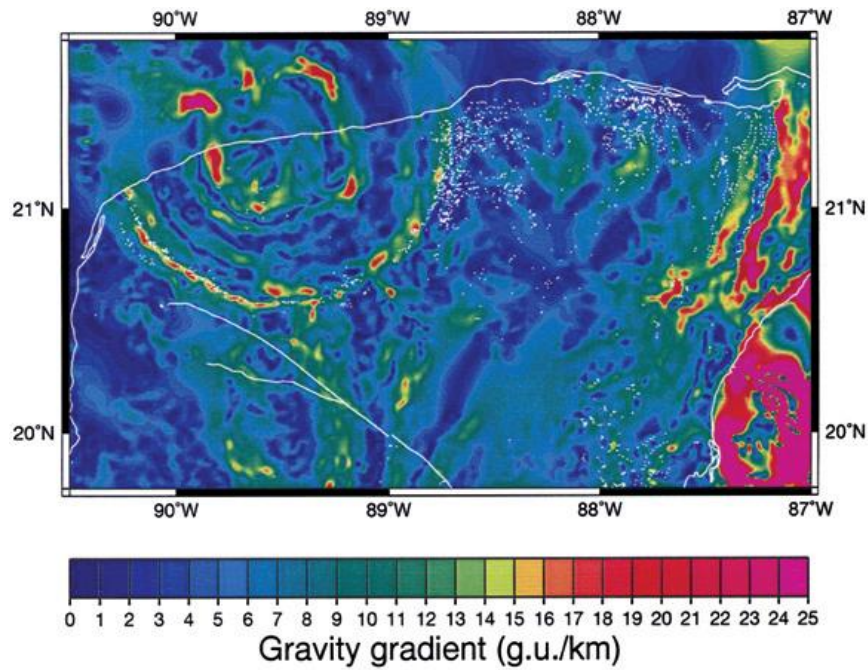


Fig. 2.4 Gradiente horizontal de gravedad calculado a partir de la Anomalia de Bouguer. Imagen tomada de Urrutia, J., et al., 2010), The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico, Geofísica Internacional, No. 50, p. 104.

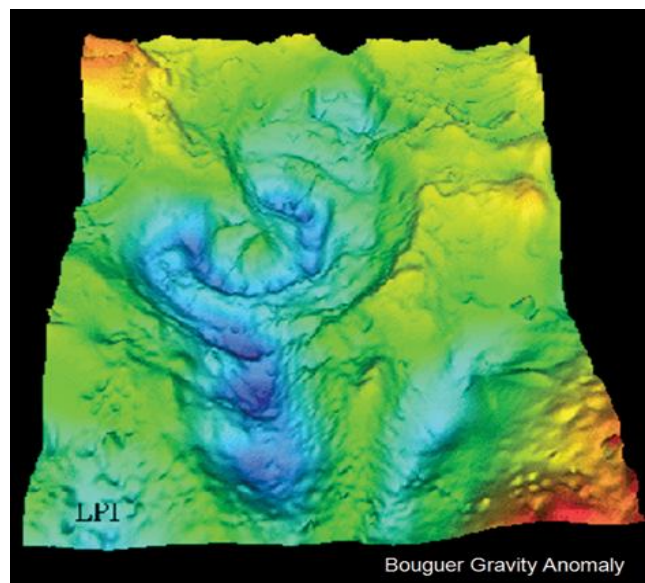


Fig. 2.5 Representación 3D de un mapa de Anomalia de Bouguer sobre el cráter Chicxulub. Imagen tomada de Urrutia, J., et al., 2010), The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico, Geofísica Internacional, No. 50, p. 102.

### 2.3.2 Estudios Sísmicos de Reflexión

La reflexión sísmica ha permitido obtener perfiles para definir la geometría, así como la existencia de fallas relacionadas con anillos en la parte exterior del borde del cráter.

En 1996, el International Scientific Drilling Program ICDP, por medio de la compañía Geco-Sigma adquirió cuatro líneas sísmicas marinas con una longitud aproximada de 160km cada una (Línea A, A0, B y C), (Fig. 2.5).

Durante el 2005 se realizó un proyecto entre la Universidad de Arizona UTIG, la Universidad de Cambridge, el Imperial College of London y la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, con el cual se obtuvieron un total de 29 perfiles de reflexión sísmica con diferentes orientaciones, de las cuales destacan las líneas denominadas como R1, R3, R6a y R6b. (Fig. 2.5).

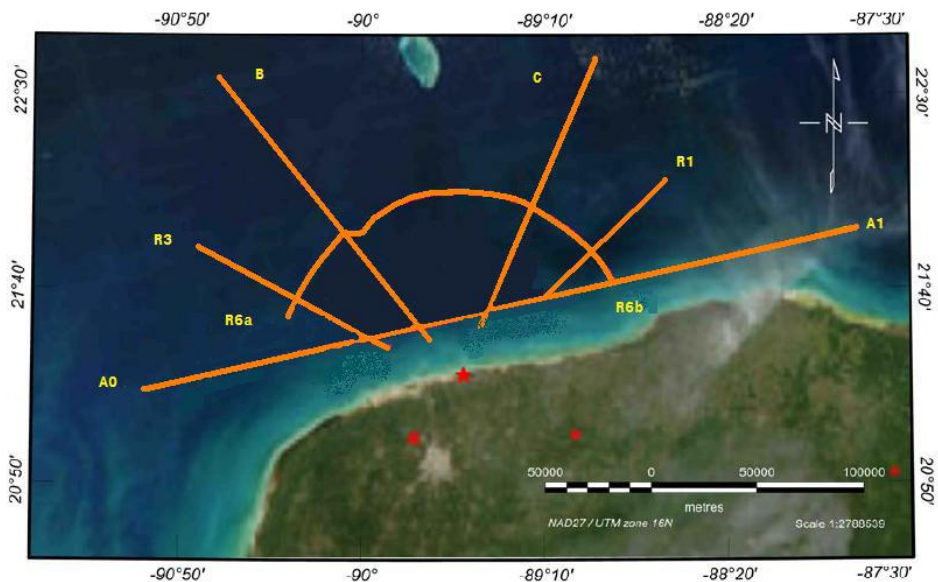


Fig. 2.5 Ubicación de los perfiles sísmicos de reflexión (líneas A0, A1, B, C, R1, R3, R6a y R6b). Imagen modificada de Mendoza, K., 2006, Mapeo de la estructura central del cráter de impacto Chicxulub.

### 2.3.3 Perforación de Pozos y Análisis de Núcleos

La perforación se ha llevado a cabo dentro del programa de exploración petrolera de PEMEX, con la recuperación de núcleos, que ha permitido correlacionar la información geofísica, con muestras de rocas que conforman la zona.

Recientemente por parte de la UNAM y la ICDP, se realizó la perforación de ocho pozos, con el programa de perforación de Chicxulub, con la recuperación continua de núcleos. Se tuvo como objetivo la obtención de información suficiente acerca de la estratigrafía de las litologías de impacto y la secuencia carbonatada del Terciario (Fig. 2.6).

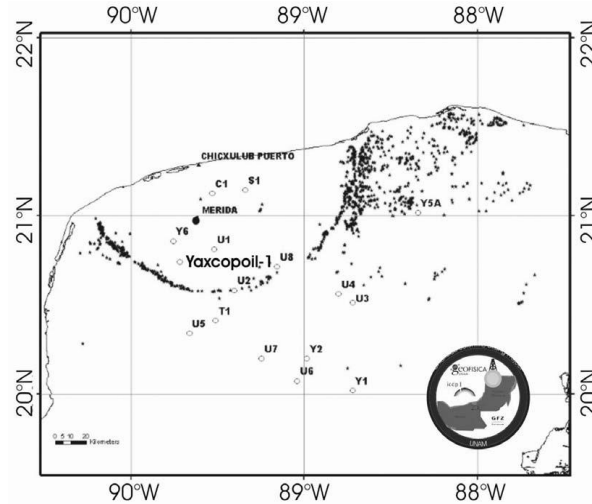


Fig. 2.6 Distribución de los pozos perforados por parte de PEMEX y la UNAM. Imagen tomada de Urrutia, J., Morgan, J., et al, 2004, The Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP), *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 39, No.6, p. 788.

Los pozos exploratorios recobraron núcleos de rocas de textura y composición volcánica y la edad de la estructura fue asumida como Cretácico tardío. Posteriormente, una re-evaluación de los datos geofísicos confirmó la interpretación de un cráter de impacto y la edad de Chicxulub fue re-examinada, asociándosele con el límite K-T (Hildebrand et al., 1991; Sharpton, et al., 1992).

## 3. MÉTODOS

---

### 3.1 Estudio Sísmico de Reflexión

El método sísmico de reflexión es un método ampliamente utilizado en la exploración geofísica que permite obtener información del subsuelo a través del registro de los tiempos de llegada de ondas elásticas producidas por una fuente artificial como explosiones, vibraciones o impactos mecánicos; éstas ondas se propagan a través del subsuelo y se detectan en la superficie mediante el arreglo de sensores conocidos como geófonos una vez que han sido reflejadas en las distintas interfases o formaciones geológicas, obteniéndose finalmente una imagen del subsuelo.

La reflexión se deriva del Principio de Huygens que considera un frente de onda que incide sobre una interfase plana y tiene su base fundamental en la Ley de Snell, la cual se establece para movimientos ondulatorios que inciden en una interfase con velocidades contrastantes y que indica que el seno del ángulo de la onda que incide en un medio es igual al seno del ángulo de la onda reflejada:

$$seni = senr$$

Al llegar un frente de onda al contacto entre dos capas con velocidades diferentes, parte de la energía es reflejada en el medio incidente, esto se cumple en cualquier contacto entre capas si existe un contraste en las velocidades de ambas. El tiempo total de trayectoria se define como el tiempo que transcurre en que la onda recorra la distancia AB y BC con una velocidad de propagación promedio entre la superficie y la capa reflectora (Fig. 3.1).

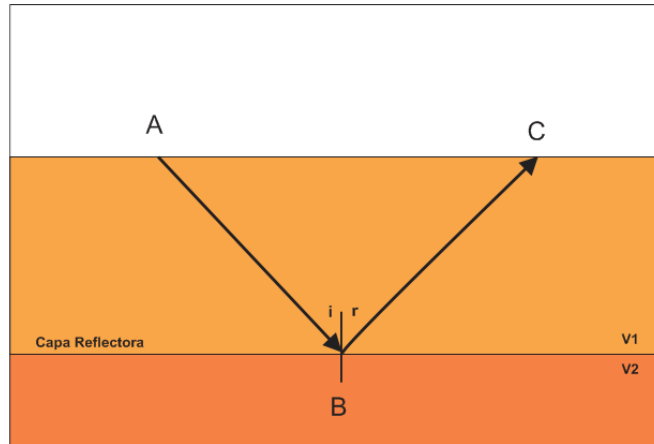


Fig. 3.1 Trayectoria de una onda reflejada.

Cada una de las señales sísmicas recabadas en los geófonos son llamadas trazas sísmicas, las cuales se agrupan de acuerdo al punto de reflejo que tienen en común cada una de ellas, lo que es conocido como CDP (Common Depth Point). Este proceso consiste en registrar las señales sísmicas provenientes de un mismo punto de un reflector del subsuelo para diversas combinaciones entre fuentes y geófonos (Fig. 3.2). A través de este procedimiento es posible sumar (stack) convenientemente corregidas todas las trazas sísmicas que pertenecen a un CDP (correspondientes a un mismo punto físico del subsuelo) con la intención de mejorar la relación señal/ruido.

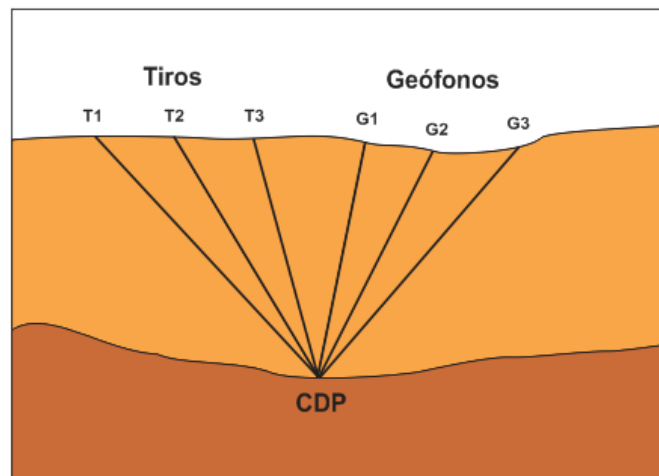


Fig. 3.2 Esquematización de un CDP.

Para sumar correctamente las trazas es necesario corregir previamente los tiempos de llegada de las reflexiones, debido a las variaciones del offset. Esta corrección se denomina NMO y para aplicarla es necesario conocer la velocidad del medio en que se propagan. Una vez estimada la velocidad para corregir las trazas se pueden sumar las amplitudes de cada una de ellas, obteniéndose una traza única para cada CDP; de este modo se obtiene una imagen cuyas coordenadas son doble tiempo de recorrido en la ordenada y distancia en la abscisa. Sin embargo, en la imagen se tendrán efectos como difracciones, las cuales tienen que colapsarse a un punto a través del proceso llamado migración, el cual consiste en posicionar los reflectores buzantes (no planos) en su posición correcta.

Una vez que se han aplicado correcciones, puede mejorarse la señal eliminando reflexiones múltiples como para el caso de sismica de reflexión marina, las primarias del agua (en fondo marino), hasta reflexiones más profundas. Estos efectos no son siempre fáciles de detectar, debido a que la señal (múltiple) llega al geófono con un tiempo doble o triple respecto a las primeras llegadas, y con amplitud y frecuencia similares, lo que puede coincidir con las llegadas de estructuras de interés.

### **3.1.1 Trabajo de campo**

En la operación de campo se acostumbra utilizar la energía producida por una perturbación para obtener la información que proviene del subsuelo en varios detectores en la superficie, los sismo-detectores generalmente se colocan en línea con el punto de impacto, separados una distancia previamente seleccionada de acuerdo a las características de respuesta de la capa objetivo.

Los sistemas de generación de energía sísmica pueden quedar incluidos en: explosivos, sistemas mecánicos y chispas eléctricas. En la actualidad los sistemas más populares para exploraciones marinas profundas son los cañones neumáticos, este sistema utiliza la energía de aire comprimido en una cámara, la cual se libera en el momento que se va a hacer la perturbación, y el aire comprimido acciona un pistón o un dispositivo que produzca la perturbación.

El aire comprimido es suministrado por una compresora a una cámara que está cerrada mediante una válvula. En el momento que se va a producir el impacto se abre la válvula, accionada por un sistema eléctrico o por una señal controlada por radio, escapando el aire hacia la otra cámara en donde se acciona un pistón o sale instantáneamente a través de toberas que aseguran que el aire va a salir en una dirección predeterminada.

En los modelos para uso marino, usualmente el cañón o pistón está recubierto por una malla metálica sobre la cual se tiene una funda de hule que se expande súbitamente al salir el aire comprimido, produciendo el impacto a su alrededor, reciclando el aire comprimido y poniéndolo a disposición para un nuevo impacto.

El cañón o pistón neumático es remolcado por un barco para realizar un registro continuo, y colocado a cierta profundidad bajo la superficie para eliminar el efecto de las olas superficiales (Fig. 3.3). La presión del aire comprimido puede ser hasta de 10,000 (lb/pulg<sup>2</sup>) tomando en cuenta que por la naturaleza de la observación continua no pueden hacerse impactos sucesivos en el mismo punto.

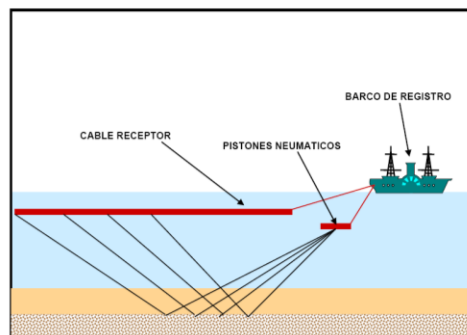


Fig. 3.3 Pistón neumático arrastrado por una embarcación.

Una vez generada la onda sísmica, tenemos que registrar la información de los eventos que se produjeron, para ello es necesario contar con sismo-detectores, que para el caso marino se llaman hidrófonos y un sistema de registro o sismógrafo.



### **3.1.2 Adquisición**

El esquema general del método identifica tres zonas importantes en la adquisición de la información necesaria para identificar las características de las capas del subsuelo:

1. Mecanismo de fuente en donde se generan las ondas sísmicas mediante explosivos o sistemas mecánicos. Se tiene algún control sobre las características de la onda que se inyecta al subsuelo.
2. Zona donde se propaga la onda sísmica, las que pueden regresar a la superficie en trayectorias reflejadas, en interfaces definidas por el contraste de propiedades elásticas. El comportamiento de las trayectorias depende de la distribución de propiedades físicas de los materiales que constituyen el paquete de sedimentos. No se tiene control sobre su comportamiento, sin embargo, mediante pruebas y análisis de la información se pueden diseñar técnicas de adquisición de datos y procesos de mejoramiento que permiten disponer de los elementos más confiables para la adecuada interpretación y transformación de la información geofísica en términos geológicos factibles.
3. Sistema de detección y registro de los eventos sísmicos que regresan a la superficie, el cual consiste de un conjunto de sismo-detectores (geófonos o hidrófonos) que se encuentran conectados a un cable que recoge todos los eventos que llegan a la superficie y los lleva a un sismógrafo que va a registrarlos, previa amplificación de las señales sísmicas, que son muy débiles y poco perceptibles.

#### **3.1.2.1 Campaña de 1996**

En 1996, el International Scientific Drilling Program ICDP, por medio de la compañía Geco-Sigma adquirió cuatro líneas sísmicas marinas con una longitud aproximada de 160 km cada una (Fig. 3.5):

- A0 y A1, se unen para formar un solo perfil, que pasa a 26 km del centro del cráter y corre de SW a NE. Su localización exacta en latitud y longitud es, para la línea A0  $21^{\circ}15' N$ ,  $100^{\circ} W$  y finaliza a los  $21^{\circ}30' N$ ,  $89^{\circ}35' W$  donde comienza la línea A1, que finaliza a los  $21^{\circ}55' N$ ,  $87^{\circ}35' W$ .
- La línea B presenta una distancia radial de 29 a 160 km con respecto del centro del cráter y va en dirección SE-NW desde los  $21^{\circ}25' N$ ,  $89^{\circ}40' W$  hasta los  $22^{\circ}35' N$ ,  $90^{\circ}40' W$ .
- La línea C presenta una distancia radial de 29 a 160 km con respecto al mismo punto y toma dirección SW-NE desde los  $21^{\circ}30' N$ ,  $89^{\circ}30' W$ , hasta los  $22^{\circ}40' N$ ,  $88^{\circ}55' W$ .

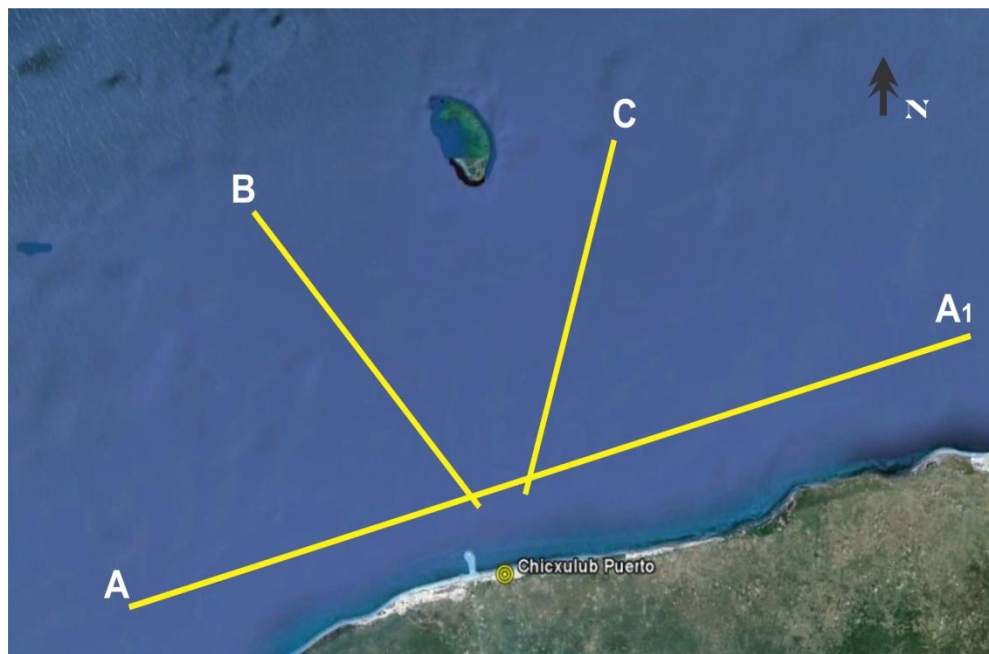


Fig. 3.5 Líneas Sísmicas A, A1, B y C, adquiridas en la campaña de 1996.

Imagen base modificada de Google Earth, 2011.

El objetivo de estas observaciones fue la visualización de la geometría del cráter, a diferentes profundidades, por lo que la información debía ser de alta y de baja resolución. Se planeó un tendido de hidrófonos, con las siguientes características: 162 detectores cerca del barco con una separación de 12.5 metros y 78 con separación de 50 metros.

Los datos de baja resolución fueron obtenidos con un tendido activo de 5925 metros de longitud y separación de hidrófonos de 50 metros. En los datos de alta resolución se utilizó un tendido de 2025 metros con un intervalo de disparo de 50 metros y un intervalo de exposición cuatro veces mayor para el receptor.

El arreglo de pistolas de aire se diseñó para tener un espectro entre 8 y 50 Hz que sirve para obtener ambos tipos de datos. La siguiente tabla muestra los parámetros usados en la adquisición de los datos (Tabla 1).

<b>Source volume</b>	150 liters	9162 in <sup>3</sup>	<b>Receiver groups</b>	240	Configured 162x12.5 m and 78x50 m
<b>Source pressure</b>	13.8 M Pa	2000 psi	<b>Streamer depth</b>	10 +/- 1.5 m	
<b>Source array</b>	36 air guns	75 m wide by 18.5 m	<b>Near offset</b>	152	
<b>Source power</b>	171 bar m	In 3-125 Hz band with	<b>Sample rate</b>	2 ms	
<b>Source depth</b>	6 +/- m		<b>Record length</b>	18 s	
<b>Source interval</b>	50 m		<b>Filters</b>	Low cut	3 Hz 18 db/octave
				High cut	128 Hz 72 db/octave
<b>Navigation</b>	Multifix DGPS				

Tabla 1 Parámetros de adquisición, campaña 1996. Tabla modificada de Salguero, E., 2008, Tesis Doctoral.

### 3.1.3 Procesamiento

Desde el momento en que los datos de campo (registros sísmicos) son introducidos en una estación de trabajo, el procesado comienza, y se puede subdividir en tres etapas (Yilmaz, 2001).

1. Pre-apilamiento (pre-stack): Es donde se lleva a cabo la deconvolución y se compone de diferentes tratamientos:

- Almacenamiento: Los datos de campo son grabados en diferentes tipos de formatos, que deben ser compatibles con el software utilizado.
- Definición y establecimiento de la geometría: Se definen las coordenadas (x, y, z) de cada una de las estaciones, ya sean fuentes o receptores, así como el offset y el azimut (skid). Una vez definida la geometría de la línea sísmica se procede a establecerla para cada traza y cada tiro, así todo quedará perfectamente ubicado.
- Edición de los registros: Durante la adquisición de datos, el registro tiene que ser de alta calidad, ya que los resultados posteriores dependerán de esta etapa, para ello se llevan a cabo diferentes procesos, entre los cuales están: la eliminación de trazas (kill trace), donde se excluyen, parcial o totalmente aquellas trazas que presentan ruido o malas conexiones; el cambio de polaridad (reverse trace), ya que algunas trazas suelen presentar cambios de polaridad debido a efectos de sitio o intercambio de conexiones; la lectura de los primeros arribos, que permitirá hacer correcciones estáticas; eliminación de las refracciones (tope mute), las señales de primeras llegadas correspondientes a las refracciones deben eliminarse o de lo contrario se superpondrán a las reflexiones; el borrado directo por zonas (surgical and bottom mute), existen eventos sísmicos que a pesar del tratamiento aplicado no es posible eliminarlos del todo, entonces es necesario suprimir estos trenes de onda mediante borrado directo, un ejemplo puede ser cuando los registros poseen ondas superficiales de fuerte aliasing; la aplicación de filtros, es el último proceso de esta etapa y tiene como objetivo eliminar el ruido y resaltar los eventos de reflexión, por lo general operan sobre las bases de la frecuencia y la amplitud de las trazas, aunque también se pueden utilizar otros en los que se toma en cuenta la longitud de onda, para elegir el tipo de filtro se realizan análisis espectrales en el registro.
- Aplicación de correcciones estáticas: En el estudio se tendrá generalmente una capa superficial, altamente heterogénea y meteorizada que posee bajas velocidades y presenta

un relieve irregular; estas características influyen en las trayectorias de los rayos de las capas profundas, así que es preciso corregir, para obtener un buen resultado de los reflectores de interés. El principal objetivo es ajustar el tiempo de viaje, al que se observaría si los receptores y la fuente se ubicaran al mismo nivel sobre un plano de referencia por debajo de la capa superficial, de la cual debemos determinar su espesor y velocidades midiendo directamente a través de un tiro de verificación o mediante refracción estática (los tiempos de esta capa son atribuidos a las primeras llegadas, con ellos se construye la curva distancia-tiempo y se calculan sus velocidades y profundidades), una vez caracterizada la superficie, elegimos el nivel que se utilizara de referencia y se calculan los intervalos de tiempo que deberán corregirse para cada rayo de la línea sísmica.

- Correcciones de amplitud: La amplitud varía ampliamente debido a los efectos de decaimiento de la energía con la distancia, a la atenuación, entre otros, para compensar estos factores se aplican varios algoritmos, basados en criterios específicos. El control de ganancia programada (programmed gain control, PGC), es la corrección más simple y consiste en asignar un valor predefinido a los datos y corrige el decaimiento de la amplitud; el control de ganancia automática (automatic gain control, AGC), es una de las funciones de ganancia más utilizadas y se obtiene calculando el valor medio dentro de una ventana específica de tiempo; posteriormente se obtiene la relación entre el valor RMS deseado y el promedio antes calculado, este número se le asigna a la función de ganancia que se le aplicará a cada muestra dentro de una ventana temporal previamente elegida.; la corrección de amplitud por divergencia esférica (true amplitude recovery, TAR), esta corrección pretende reconstruir las amplitudes debido a la absorción de los materiales y al decaimiento de los frentes de onda con la distancia.
- Deconvolución: Puede ser aplicada en las diferentes etapas del procesamiento, es un algoritmo que se utiliza con el fin de aumentar la resolución temporal de las reflexiones, se invierte una ondícula base (existen varios tipos de ondículas sobre las cuales se opera, por ejemplo la delta de Dirac, que convierte los lóbulos de reflexión en picos) y convolucionándola con cada traza, con lo cual se comprime la señal.

2. Apilamiento (stack): Es la etapa donde se lleva a cabo el análisis de velocidades.

- Ordenamiento CMP: Una vez que los datos han sido editados, se procede a realizar un reordenamiento de las trazas sísmicas en conjuntos de puntos de reflejo común CMP (common mid point). Este ordenamiento consiste en agrupar las trazas que por geometría pertenecen a un mismo punto medio entre una fuente y un receptor determinado. Se deduce por construcción, que el espaciado entre CMP es la mitad del espaciado entre geófonos y que las reflexiones en estos conjuntos poseen también trayectorias hiperbólicas.
- Aplicación de correcciones dinámicas (NMO): Tomando en cuenta que todas las trazas pertenecientes a un mismo punto reflector, exhiben las mismas características reflectivas, pueden sumarse para obtener una traza resultante (traza CMP) que posee mejor relación señal/ruido. Antes de realizar la suma, la trayectoria hiperbólica de cada evento debe ser transformada, en el eje del tiempo, en una línea horizontal, de manera que todas las trazas al ser sumadas estarán en fase. Esta es la corrección NMO (normal move out) y la forma de conseguir dicha alineación es mediante la asignación de la velocidad de la trayectoria de reflexión.
- Análisis de velocidad: Para proveer una relación señal/ruido mejorada, se requiere información sobre la velocidad del subsuelo, la cual es obtenida mediante un análisis de velocidad. Este proceso se realiza sobre conjuntos o grupos de conjuntos de CMP determinados. Se obtiene un campo de velocidades que se usará en el apilamiento para obtener la sección sísmica.
- Apilamiento: Con los resultados del análisis de velocidad, se procede a sumar las trazas CMP que forman una imagen de los reflectores presentes en el subsuelo con offset cero y tiempos dobles de viaje.

3. Post-apilamiento (post-stack): Contiene el proceso de migración como algoritmo principal:

- Procesamiento post-apilamiento: En este paso se incluye una deconvolución, para recuperar las altas frecuencias perdidas durante el apilamiento, se aplica un filtro pasa-banda para eliminar el ruido asociado a bajas y altas frecuencias generado o residual en el apilamiento, y finalmente se introduce algún tipo de ganancia de amplitud a fin de lograr una mejor visualización.
- Migración: Es un proceso que se aplica para corregir las difracciones que se producen debido a un relieve brusco en algún reflector, es necesario reubicar esta energía a su posición original, colapsando las difracciones en sentido opuesto.
- Conversión a profundidad: Las secciones sísmicas se encuentran en tiempo doble, ya que cada rayo ha hecho un viaje de ida (incidencia) y vuelta (reflexión). Para concluir con el procesado de la información se proporciona una referencia a profundidad de dichas imágenes sísmicas.

### **3.2 Estratigrafía Sísmica de Secuencias**

Un reflector sísmico representa un contraste en las impedancias acústicas de los medios y son generados a lo largo de superficies con dicho contraste; el concepto es fundamental dentro de la estratigrafía sísmica. Los reflectores pueden ser caracterizados por su amplitud, continuidad, frecuencia dominante, las cuales son de gran ayuda para determinar el ambiente de depósito de los sedimentos.

La estratigrafía sísmica es la disciplina que interpreta y modela la estratigrafía, facies sedimentarias, e historia geológica a partir de datos sísmicos de reflexión, en relación con cambios globales y al nivel de cuenca (Cross y Lessenger, 1988).

La mayor parte del desarrollo y estructura de la estratigrafía sísmica ha sido dirigida hacia la industria petrolera incrementando la relevancia de los datos sísmicos en la exploración de zonas de frontera y zonas más profundas de las cuencas sedimentarias, donde el control a través de pozos está limitado. El método de estudio comprende el establecimiento de secuencias de unidades y la identificación de facies sísmicas:

El *análisis de secuencias sísmicas* consiste en la subdivisión de la sección sísmica en conjunto de depósitos limitados por superficies de discontinuidad, que comprenden grupos de reflectores más o menos concordantes y de características similares, básicamente geométricas. Se basa en la identificación de secuencias deposicionales, sus tres dimensiones y su posición con respecto a otras secuencias y a la cuenca sedimentaria en sí, independientemente de la litología, contenido fósil, u otros constituyentes dentro de los estratos de la secuencia sísmica (Fig. 3.6).

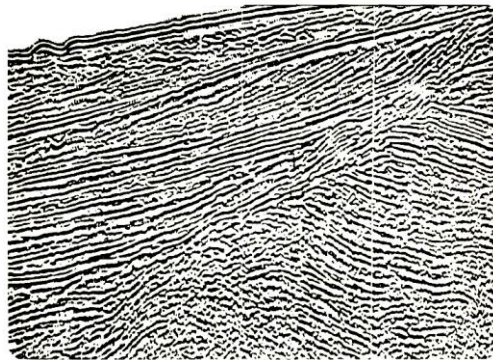


Fig. 3.6 Identificación de secuencias sísmicas a través de discordancias en los reflectores.

Todos los estratos de una secuencia fueron depositados durante un intervalo de tiempo, el cual difiere de los intervalos de las secuencias subyacentes y suprayacentes. La técnica para marcar secciones sísmicas comienza por reconocer las disconformidades donde las angularidades son evidentes y después seguirla a través de zonas donde no se presenten angularidades.



El *análisis de facies sísmicas* se basa en la interpretación y determinación de la litología, ambiente de depósito e historia geológica de los estratos contenidos en la secuencia deposicional, a partir de los parámetros acústicos de los reflectores que constituyen la secuencia. Estos parámetros incluyen: continuidad, amplitud, frecuencia y velocidad de intervalo (Fig. 3.7).

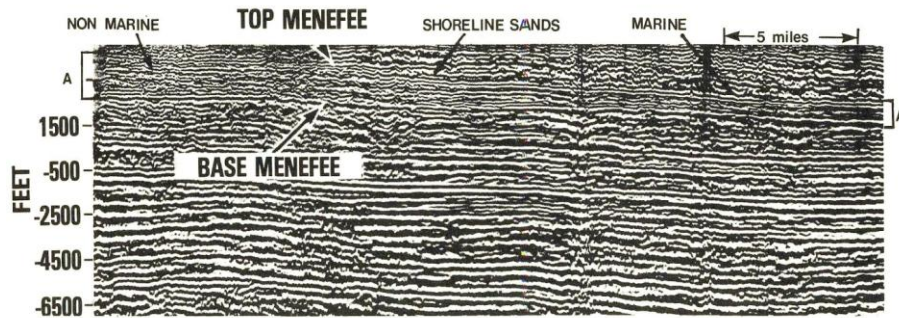


Fig. 3.7 *Análisis de facies sísmicas.*

El desarrollo de las secuencias está relacionado con la interacción de factores globales y regionales tales como ciclos globales de cambio de nivel del mar, diastrofismo, subsidencia y aporte sedimentario.

## 4. EL POZO YAXCOPAIL-1

---

El pozo Yaxcopoil-1 (Yax-1) se localiza en la Hacienda Yaxcopoil, a 40 km al suroeste de la ciudad de Mérida, en el estado de Yucatán y aproximadamente 60 km del centro del cráter (Fig. 4.1). Su locación fue elegida debido al control estratigráfico en los pozos petroleros cercanos y por su posición en el cráter, la cual estructuralmente se encuentra entre el anillo interior y el anillo exterior, por lo cual se esperó que penetrara cientos de metros de las litologías de impacto.

El proyecto CSDP (Chicxulub Scientific Drilling Project) fue financiado por parte de la UNAM, CONACYT y el ICDP (International Continental Scientific Drilling Program), siendo perforado desde Diciembre de 2001, hasta Febrero de 2002 (Urrutia-Fucugauchi et al., 2000, 2004). Los estudios pre-sitio, evaluación de impacto ambiental, perforación del pozo de abastecimiento de agua para la perforación y la preparación e instalación de la torre de perforación, se realizaron durante 2001.



Fig. 4.1. Localización del cráter Chicxulub y del pozo Yaxcopoil-1 en la Península de Yucatán. La estrella indica la localización del pozo. Imagen modificada de Google Earth, 2011.

Se extiende hasta una profundidad de 1511 metros y se realizó la recuperación continua de núcleos desde los 404 metros hasta los 1511 metros. En términos generales, intercepta desde la superficie hasta el fondo, 795 metros de rocas carbonatadas del Terciario, 100 metros de las litologías de impacto, entre los 795 y 895 metros y 616 metros de rocas carbonatadas del Cretácico (Kring et al., 2004; Tuchscherer et al., 2004).

#### **4.1 Columna Litológica (1511m - 775m)**

De acuerdo al análisis de núcleos, se han definido unidades bio-litoestratigráficas a través de los 1100 metros de núcleos recuperados. De acuerdo a Stinnesbeck et al. (2004), la columna se divide en 10 unidades (A-K, Fig. 4.2), desde los 1511 metros, hasta los 775 metros. La unidad A abarca de 1495 a 1511 metros y consiste de brecha compuesta de clastos de dolomita, caliza dolomítica y anhidrita, además se presentan intercalaciones de dolomita y anhidrita.

La unidad B abarca desde los 1452 hasta 1495 metros y está compuesta de caliza tipo wackestone con abundantes foraminíferos planctónicos, de acuerdo a estudios de lámina delgada, así como presencia de margas. La unidad C, abarca desde 1452 a 1315 metros y consiste predominantemente de dolomías estratificadas, capas de brecha y nódulos de anhidrita. La unidad D tiene un espesor de 160 metros y está localizada entre 1315 y 1155 metros, cuyo contacto con la unidad C es transicional; está caracterizada por abundantes capas de anhidrita de color grisáceo, algunas de las cuales presentan laminación paralela; se presentan además intercalaciones de dolomía y caliza dolomítica de poco espesor.

La unidad E se encuentra entre 1124 y 1155 metros, teniendo uno de los menores espesores, está compuesta por calizas blancas a grisáceas y calizas dolomítica con nódulos de anhidrita. La unidad F abarca de 1040 a 1124 metros y consiste de capas de anhidrita masiva grisácea y caliza dolomítica; se presentan intercalaciones mayores a 1 metro de espesor de brecha compuesta de clastos de dolomita y anhidrita. La unidad G tiene un espesor de 146 metros y abarca de los 894 a 1040 metros, se compone de capas de dolomía y caliza dolomítica con ausencia de anhidrita; los análisis de lámina delgada indican calizas de tipo packstone y grainstone.

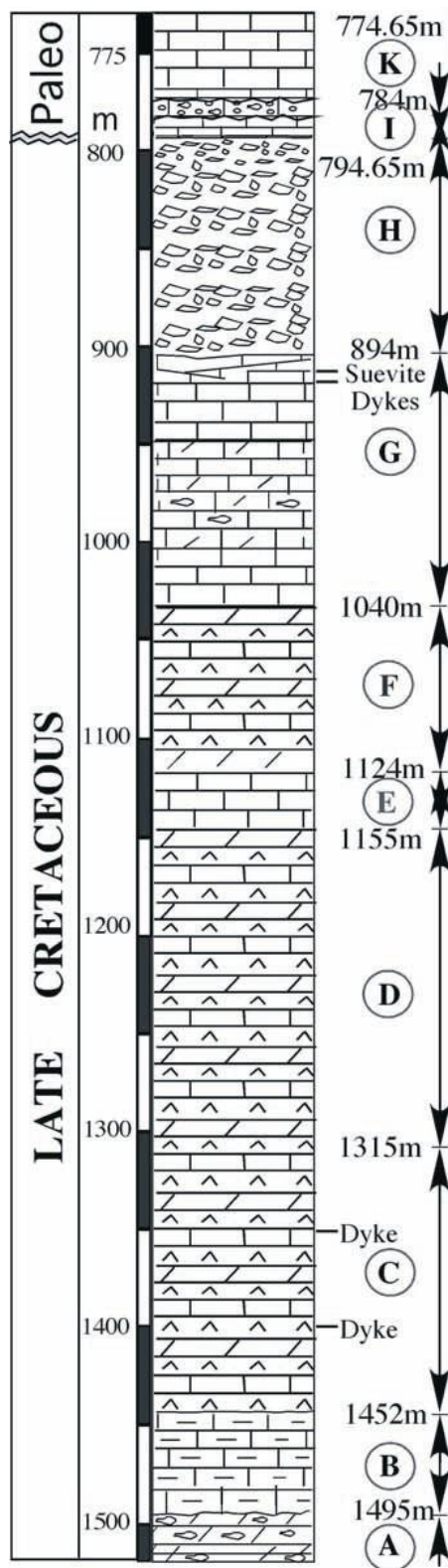


Fig. 4.2. Columna litológica del pozo Yax-1, a partir de 774.6 metros a 1511 metros. Columna modificada de Stinnesbeck, W., Keller, G., et al., 2004, Yaxcopoil-1 and the Chicxulub impact, *Int. J. Earth Sci.*, No. 93, p. 1045.

La unidad H se encuentra desde 794.6 a 894 metros y está compuesta de cien metros de brecha de impacto suevítica con contactos (superior e inferior) erosionados; los clastos de las brechas son angulosos a subangulosos y de pocos centímetros de diámetro. Se trata de una brecha polimíctica compuesta de clastos de dolomía, caliza y arenisca; contiene además en menor medida, fragmentos de roca fundida y rocas cristalinas provenientes del basamento, como granitos, gneises, cuarcitas y esquistos.

La unidad I abarca desde 784 a 794.6 metros y está conformada básicamente por calizas dolomíticas; ésta unidad sobreyace en el contacto erosionado de la unidad H, en el cual se presentan láminas de arenisca calcárea. Entre esta disconformidad y el límite K/T, se encuentra una capa de 50 cm de espesor representada como la unidad Ia. La unidad Ia está compuesta por caliza micrítica, la cual presenta laminación paralela. La unidad Ib consiste de calizas micríticas blancas y grisáceas (wackestones de foraminíferos planctónicos).

Finalmente la unidad K abarca de 784 a 774.65 metros y consiste de calizas margosas (wackestones de foraminíferos planctónicos), intercaladas con capas de conglomerados, cuyo espesor varía de pocos centímetros, hasta 3 metros.

## **4.2 Columna Litoestratigráfica (792m - 404m)**

De acuerdo a Escobar (2011), a través del análisis de lámina delgada de los núcleos de perforación, con un intervalo de muestreo de 5 metros, la columna se divide en 12 unidades litoestratigráficas (1-12, Fig. 4.3), desde los 792 metros, hasta los 404 metros.

La unidad 1 tiene un espesor de 5 metros, abarcando de los 792 a los 787 metros, está compuesta básicamente por caliza limosa, la cual presenta estratificación cruzada. La unidad 2 se compone de caliza conglomerática, con un espesor de 15 metros, abarcando de los 787 a los 772 metros. La unidad 3 se compone por una secuencia de caliza lutítica, lutitas, ambas con laminación paralela, caliza limosa, caliza wackestone y caliza conglomerática, ésta última con presencia de estilolitas; se presenta de los 772 a los 737 metros y presenta contacto oblicuo con la unidad 2.

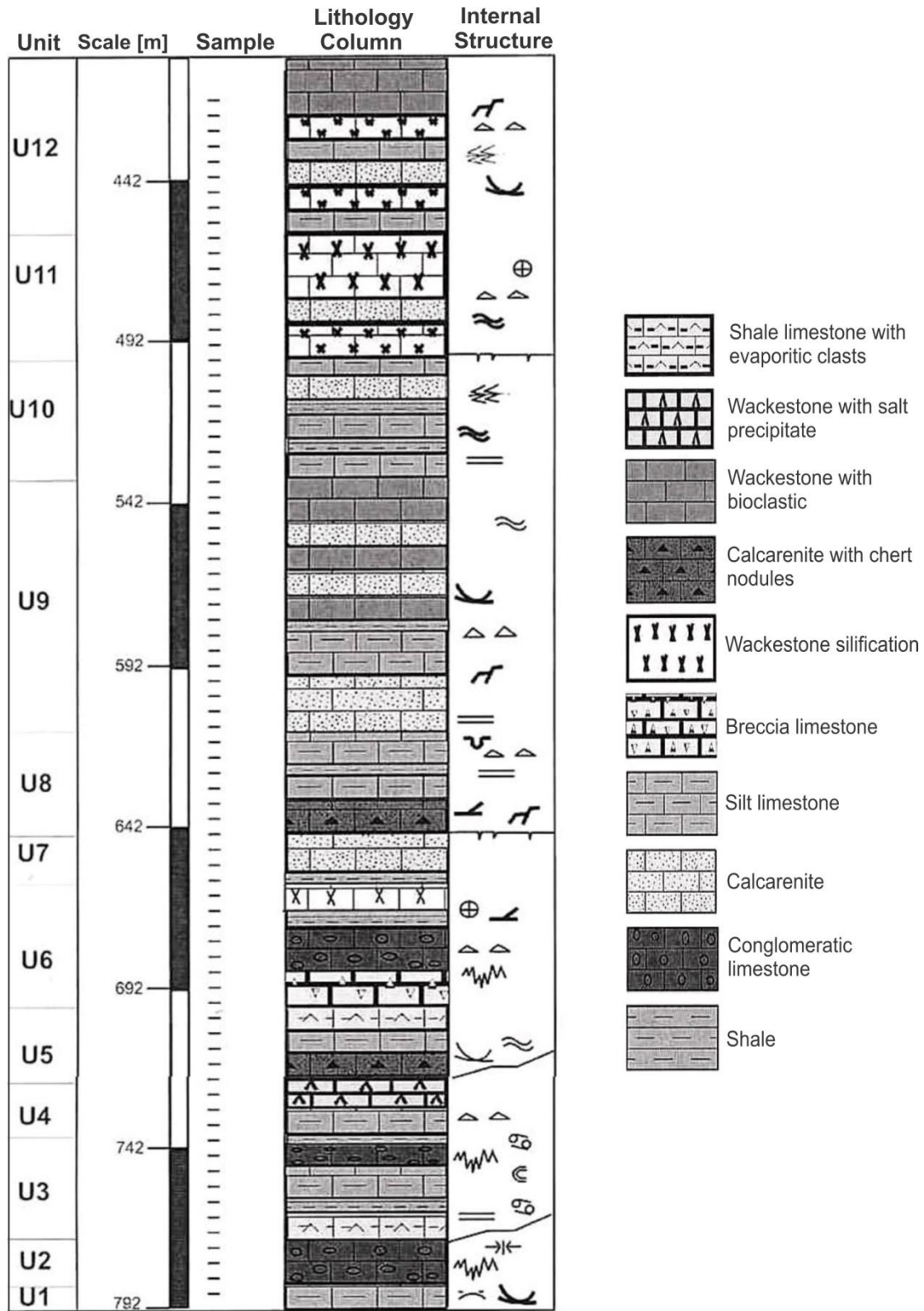


Fig. 4.3. Columna litológica del pozo Yax-1, a partir de 404 metros a 795 metros. Columna de Escobar, E., 2011, Tesis Doctoral.

La unidad 4 tiene un espesor de 20 metros y abarca de los 737 a los 717 metros, está compuesta por una secuencia de caliza limosa y una secuencia de caliza wackestone, la cual presenta precipitación de sal. La unidad 5 abarca de los 717 a los 692 metros y está compuesta por una secuencia con estratificación cruzada de calcarenita con nódulos de chert, caliza limosa y lutítica.

La unidad 6 se conforma por caliza con fragmentos de brecha, caliza conglomerática, lutitas con estratificación cruzada y caliza wackestone silicificada; se determina de los 692 a los 652 metros. La unidad 7 tiene un espesor de 15 metros, abarcando de los 652 a los 637 metros, la cual está compuesta de calcarenita.

La unidad 8 se conforma por una secuencia de calcarenita con nódulos de chert, la cual presenta laminación cruzada, calizas limosas y caliza wackestones con bioclastos; abarca de los 637 a los 605 metros, teniendo un espesor aproximado de 32 metros. La unidad 9 se presenta de los 605 a los 525 metros, siendo la unidad mayor definida; se conforma por una secuencia de calcarenita con laminación paralela, caliza limosa y una intercalación de wackestone con bioclastos y calcarenita, cuya estratificación es cruzada.

La unidad 10 se compone de una secuencia de caliza limosa con laminación paralela, lutitas, y calcarenita fracturada; abarca de los 525 metros, a los 485 metros. La unidad 11, tiene un espesor aproximado de 40 metros, definida a partir de los 485 a los 445 metros; está conformada por una secuencia de caliza wackestone silicificada y calcarenita, las cuales presentan estratificación cruzada.

Finalmente la unidad 12, se define a partir de los 445 metros hasta los 404 metros, siendo ésta la unidad superior de la columna litológica; está compuesta por una secuencia de calcarenita, caliza limosa con fracturamiento y caliza wackestone silicificada, la cual se extiende aproximadamente hasta los 422 metros; sobreyace sobre ésta, caliza wackestone con bioclastos, hasta la cima de la columna.

### 4.3 Registros de Propiedades Petrofísicas

Para el análisis de las propiedades petrofísicas de los núcleos de perforación del pozo Yax-1 de, el cual abarca la densidad y la velocidad de onda P para el presente estudio, se selecciona un intervalo de interés a partir de la información de pozo y la columna litológica.

La profundidad seleccionada se encuentra entre los 400 y 670 metros; este intervalo es una sección representativa del Terciario temprano (Paleógeno), desde hace 65 a 39 millones de años aproximadamente.

#### 4.3.1 Densidad

Para la obtención del registro de densidades a partir de las mediciones hechas en los núcleos de perforación, se tomaron las mediciones de 101 muestras de acuerdo al intervalo de profundidades correspondiente a la sección del Paleógeno.

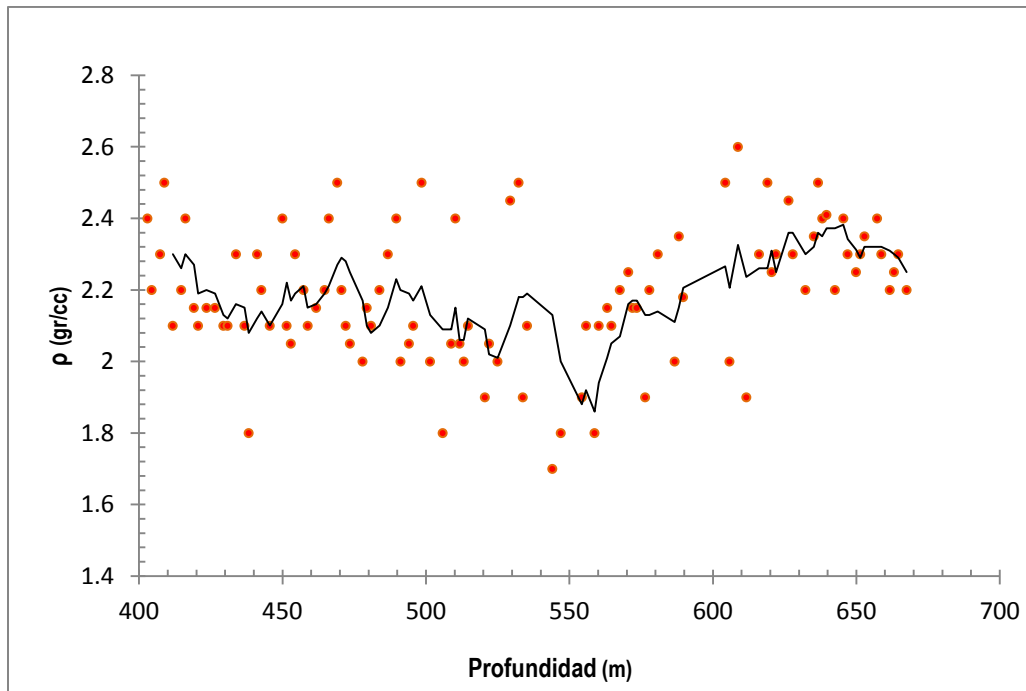


Fig. 4.4 Propiedades Petrofísicas del Pozo Yax-1 - Densidad ( $\rho$ ).



En la figura 4.4 se muestra el registro de las densidades en el pozo Yax-1; se adiciona al gráfico, una media móvil para observar de mejor forma la tendencia de los datos, por lo cual es posible separar en cuatro paquetes el registro, de acuerdo a las variaciones y cambios de densidad.

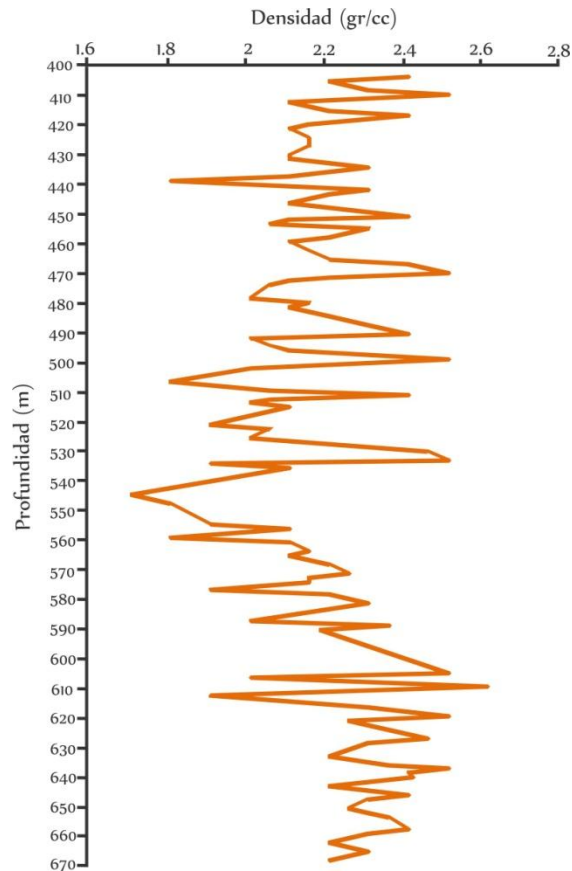


Fig. 4.5 Propiedades Petrofísicas del Pozo Yax-1 / Densidad vs. Profundidad.

La figura 4.5 muestra el registro de densidades, con el eje vertical marcando las profundidades, y el eje horizontal marcando la densidad, esto con la finalidad de realizar las correlaciones posteriores. La variación de la densidad en función de la profundidad es similar y presenta una alta correlación con los datos de velocidad de onda P (Fig. 4. 7).

En el registro pueden separarse tres secciones, entre aproximadamente los 400 y 535 metros (Fig. 4.6), entre 535 y 605 metros (Fig. 4.7) y entre 605 y 670 metros (Fig. 4.8), caracterizadas por tendencias distintas en las densidades de los estratos.

La sección 1 (Fig. 4.6), abarca de los 400 a los 535 metros aproximadamente, pero puede dividirse en subsecciones debido a la disminución en la densidad a 2 gr/cc en los 435 metros y 505 metros aproximadamente; la sección se divide entonces en tres subsecciones: la primera (1A), hasta los 435 metros, donde las densidades disminuyen de 2.4 a 2 gr/cc; la segunda subsección (1B), abarca de 435 a 505 metros, cuya media es de 2.2 gr/cc; la tercera subsección (1C), se encuentra de 505 a 535 metros, en donde la densidad aumenta de 2.2 a 2.5 gr/cc.

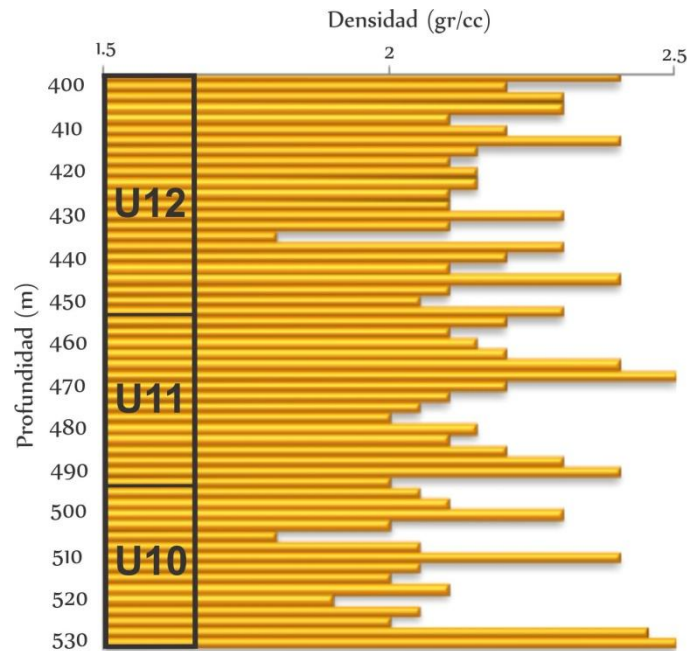


Fig. 4.6 Sección 1 a partir del registro de densidad. Se muestra la correlación con las unidades litoestratigráficas de Escobar (2011).

La sección 1 correlaciona con tres unidades litoestratigráficas de la columna de Escobar (2011); la subsección 1A puede correlacionarse con la unidad 12 (U12), la 1B abarca las tres unidades, específicamente la unidad 11 (U11), mientras que la subsección 3 correlaciona con la unidad 10 (U10).

La sección 2 (Fig. 4.7), abarca de los 535 a los 605 metros aproximadamente, y cuyas densidades aumentan desde los 2.1 gr/cc a 2.5 gr/cc; ésta sección correlaciona con la unidad 9 (U9), la cual abarca desde 532 a 622 metros aproximadamente.

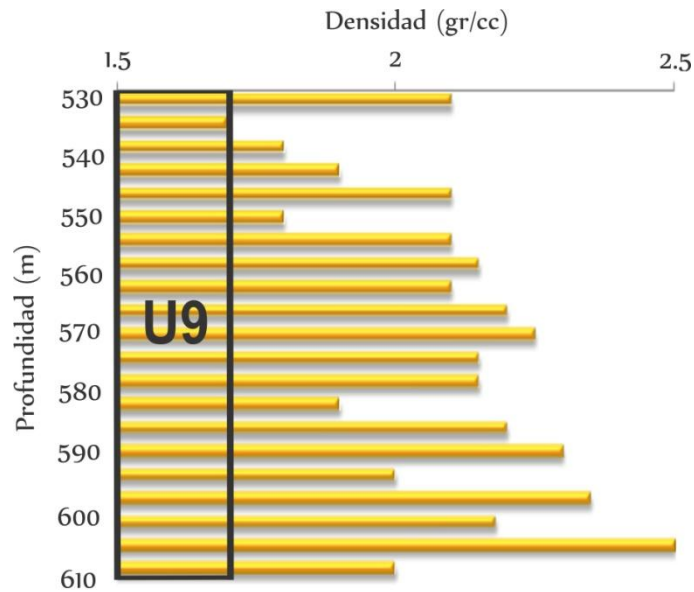


Fig. 4.7 Sección 2 a partir del registro de densidad. Se muestra la correlación con la unidad litoestratigráfica de Escobar (2011).

La sección 3 (Fig. 4.8), abarca de los 605 a los 670 metros, profundidad de la última muestra del registro. Las densidades disminuyen desde los 2.5 gr/cc a 2.2 gr/cc; ésta sección correlaciona con las unidades 8, 7 y 6 (U8, U7, U6).

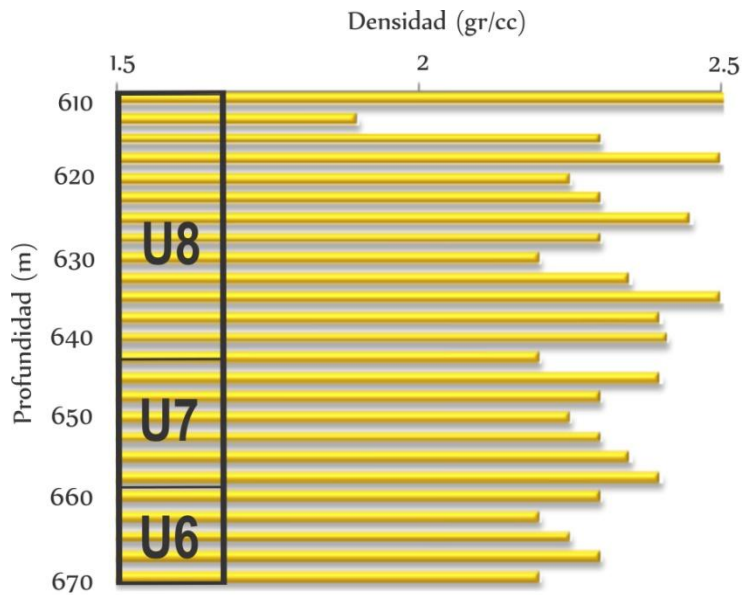


Fig. 4.8 Sección 3 a partir del registro de densidad. Se muestra la correlación con las unidades litoestratigráficas de Escobar (2011).

### 4.3.2 Velocidad de Onda P ( $V_p$ )

Para la obtención del registro de velocidad de onda P, se tomaron los valores correspondientes a las profundidades seleccionadas para el registro de densidades, por lo tanto, para ambos registros, las profundidades permanecen constantes.

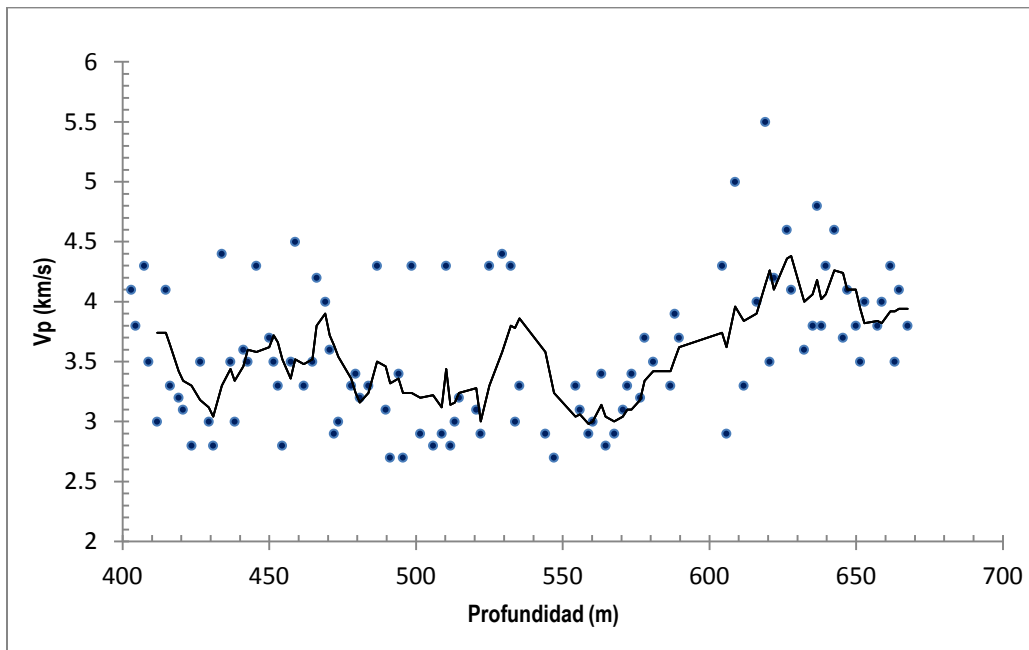


Fig. 4.9 Propiedades Petrofísicas del Pozo Yax-1 – Velocidad de Onda P ( $V_p$ ).

En la figura 4.9 se muestra el registro de las velocidades de onda P en el pozo Yax-1; así mismo se integra la media móvil de los datos, siendo posible observar la similitud de la tendencia de los datos (cambios abruptos), entre densidades y velocidades, en los 530 y 600 metros aproximadamente.

La figura 4.10 muestra el registro de velocidad de onda P, con el eje vertical marcando las profundidades, y el eje horizontal marcando la velocidad.

En el caso del registro de  $V_p$  contra profundidad, resulta complicado la identificación de paquetes en el registro, sobre todo en los primeros cien metros, debido a que las variaciones de la velocidad son fuertes entre muestras, por lo que resultaría conveniente contar con una mayor cantidad de mediciones, para tener una tendencia precisa de las velocidades, y con esto tener mayor precisión en la separación de paquetes.

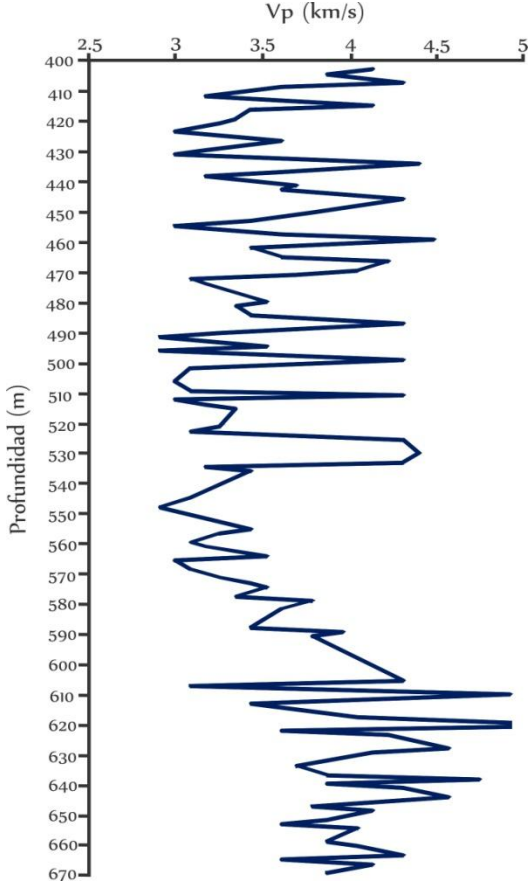


Fig. 4.10 Propiedades Petrofísicas del Pozo Yax-1 /  $V_p$  vs. Profundidad.

Las velocidades  $V_p$  varían en un rango entre 2.7 y 5.5 km/s; la variación de la velocidad  $V_p$  en función de la profundidad es similar y presenta una alta correlación con los datos de densidad (Fig. 4. 5).

En el registro se separaran tres secciones, entre aproximadamente los 400 y 535 metros, entre 535 y 605 metros y entre 605 y 670 metros, caracterizadas por tendencias distintas en las velocidades de los estratos. La media en la primera sección e intervalo es de 3.4 km/s. En el segundo intervalo las velocidades se incrementan aproximadamente de 2.9 a 4.3 km/s, mientras que la media en el tercer intervalo es de 4.1 km/s.

## 5. ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO DE SECUENCIAS

---

---

### 5.1 Interpretación de Datos Sísmicos

En este capítulo se presentan los datos de las líneas sísmicas analizadas, la información de pozos y los resultados del análisis estratigráfico inicial. Los datos sísmicos corresponden al proyecto marino y las líneas seleccionadas son líneas regionales, que cruzan la estructura del cráter y que permiten un análisis de las secuencias terciarias depositadas en el interior de la cuenca formada por el cráter y muestreadas en los pozos exploratorios. Interpretaciones de las líneas sísmicas fueron reportadas por Gulick et al. (2008), en donde se analizan los patrones de fallas y otros rasgos estructurales. Canales (2010) presentó resultados de estratigrafía de secuencias para algunas de las líneas.

Los pozos están localizados en el sector noroeste de la península de Yucatán, y a la fecha no se ha perforado en el sector marino. Para el análisis se considera el pozo Yaxcopoil-1, perforado en el sector suroeste del cráter.

#### 5.1.1 Marcado de Secciones

Para marcar los reflectores dentro de la sección sísmica comúnmente se utilizan diferentes colores, con la finalidad de diferenciar distintos paquetes. El marcado se realiza verificando la continuidad lateral de los reflectores a través de la sección.

Cada reflector marcado se denomina horizonte y se inicia generalmente con el más profundo; se marcan los reflectores más energéticos, los cuales son visibles y están bien definidos, indicando diferentes paquetes de roca y que pueden constituir diferentes unidades geológicas.

Una vez marcados los horizontes dentro de la sección sísmica, se obtiene un diagrama de línea, a través del cual se visualizan únicamente los eventos, estructuras y paquetes de interés que se han definido, para su análisis e interpretación posterior.

## 5.2 Integración de Datos de Pozo

Los horizontes propuestos de las secciones sísmicas deben ligarse a la información estratigráfica y litológica obtenida de los núcleos recuperados y mediciones hechas directamente en pozo, con la finalidad de realizar una mejor interpretación de las secciones.

En el caso Chicxulub, se han llevado a cabo diversos programas de perforación por parte de organismos internacionales y nacionales, como es el caso de PEMEX y la UNAM, en los cuales se ha obtenido recuperación continua de núcleos en algunos pozos, mientras que en otros, esto se ha hecho por intervalos discretos seleccionados (Fig. 5.1).

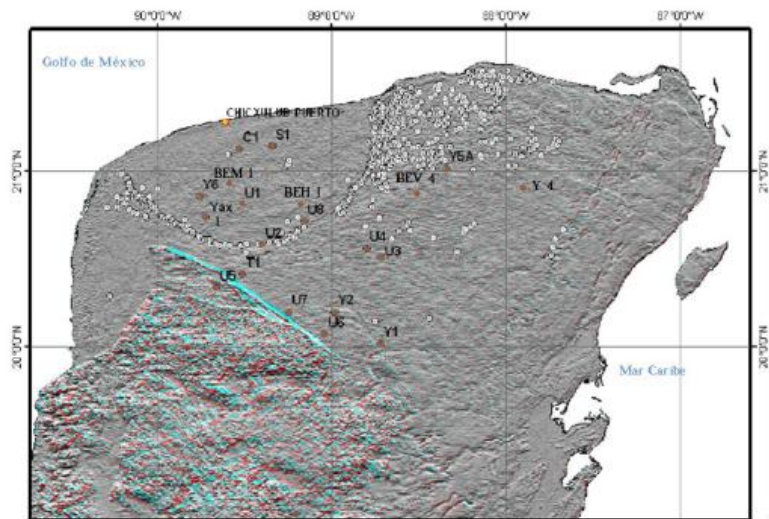


Fig. 5.1 Ubicación y distribución de los pozos en la Península de Yucatán.

Imagen modificada de Urrutia, J., 2010, Chicxulub Drilling Seismic.



La tabla 2 muestra la ubicación de algunos pozos con su respectiva profundidad de extracción de núcleos.

Pozo	Localización	Cordenadas del sitio		Profundidad de nucleos(m)	Eyecciones+ (m)
		Longitud	Latitud		
<b>BEM-1</b>	Merida	89.60°W	20.91°N	350	
<b>BEH-1</b>	Huhi	89.20°W	20.82°N	150	
<b>BEV-4</b>	Valladolid	88.50°W	20.86°N	300	250
<b>UNAM-1</b>	Timucuy	89.52°W	20.81°N	155	
<b>UNAM-2</b>	Tecoh	89.40°W	20.58°N	560	
<b>UNAM-3</b>	Kancabdzanal	88.72°W	20.51°N	138	
<b>UNAM-4</b>	Piste	88.80°W	20.56°N	63	
<b>UNAM-5</b>	Santa Elena	89.66°W	20.34°N	503	332
<b>UNAM-6</b>	Peto	89.04°W	20.07°N	702	257
<b>UNAM-7</b>	Tekax	89.25°W	20.20°N	700	222
<b>UNAM-8</b>	Huhi	89.16°W	20.71°N	101	
<b>YAX-1</b>	Yaxcopoil	89.72°W	20.74°N	1511	795

Tabla 2 Ubicación de perforaciones en el Cráter Chicxulub. Tabla modificada de Urrutia, J., et al., 2008, Impact ejecta and carbonate sequence in the eastern sector of the Chicxulub crater, *Geoscience* No. 340, p. 804.

Sin embargo, estas perforaciones se han llevado a cabo en diversos puntos del estado de Yucatán, obteniéndose con esto información de la región terrestre del cráter, mientras que en la región marina, a la fecha no se ha llevado a cabo ninguna perforación, por lo cual es necesario proyectar los pozos hacia las líneas sísmicas marinas, bajo la consideración de un cráter circular y simétrico. La proyección del pozo y sus datos es mayormente comparable en la dirección oeste (región occidental), que en la dirección este del cráter (Sharpton et al., 1996; Hildebrand et al., 1998).

Se realiza el análisis para el pozo Yax-1, por lo cual se proyecta con un radio constante hacia las línea sísmicas Chicx-A, A1, B y C, las cuales integra el presente trabajo (Fig. 5.2). A pesar de que ésta es una vía no precisa de proyección de datos estratigráficos, debido especialmente a las variaciones observadas en diferentes direcciones en la estratigrafía sísmica, se realiza tal proyección del pozo tanto para la región occidental (líneas Chicx-A y B), como para la región oriental (líneas Chicx-A1 y C).

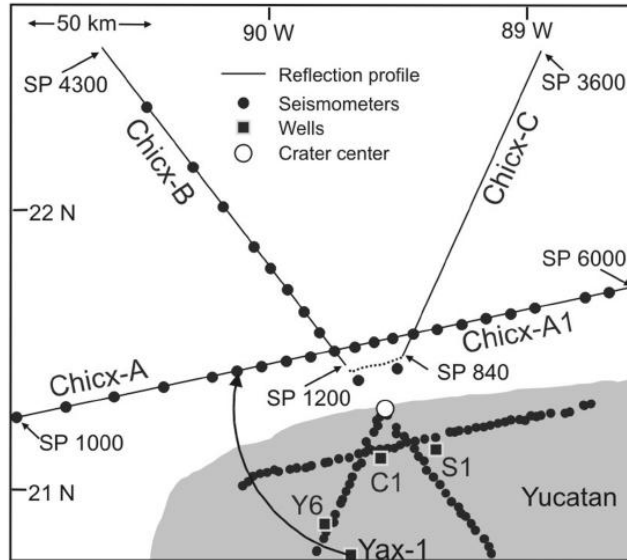


Fig. 5.2 Proyección del Pozo Yaxcopoil-1 hacia la Línea Sísmica Chicx-A. Imagen tomada de Bell, C., Morgan, J., et al., 2004, Stratigraphic and sedimentological observations from seismic data across the Chicxulub impact basin, *Meteoritics & Planetary Science*, Vol.39, No. 7, p. 2.

### 5.3 Interpretación de Secciones Sísmicas

La interpretación de las secciones sísmicas para el amarre de las secciones sísmicas se llevó a cabo en las líneas sísmicas Chicx-A y A1, las cuales a su vez forman una sola línea que corta transversalmente al cráter, además de las líneas B y C.

Las secciones sísmicas correspondientes a las cuatro líneas muestran en el eje horizontal la distancia radial hacia el centro del cráter, por lo que las secciones sísmicas son divididas en dos segmentos, empleando aquel en el que se proyecte el pozo de acuerdo a su distancia radial.

El eje vertical se muestra el doble tiempo de viaje; se consideran únicamente las secciones hasta 1.5 segundos en doble tiempo de viaje, ya que es el intervalo de tiempo correspondiente a las profundidades de los pozos en todo el área, con lo que se obtiene una mejor visualización de los reflectores sísmicos para su análisis.

El análisis estratigráfico se lleva a cabo a través de diagramas de línea, identificando los reflectores más energéticos y de mayor continuidad a lo largo de las secciones, obteniendo paquetes de reflectores con características semejantes.

Se utilizaron diferentes colores para marcar los reflectores a través de líneas sólidas, utilizando distintos colores para diferenciarlos, siendo la curva en color rojo, el reflector que marca el contacto entre los carbonatos del Paleoceno y las brechas de impacto del Cretácico, el cual se encuentra por arriba de un segundo en doble tiempo de viaje, para las cuatro líneas sísmicas.

Los horizontes propuestos tendrán un primer amarre a partir del contacto brechas-carbonatos, considerado a una profundidad de 795 metros a partir de cual, se determinarán las profundidades y el amarre posterior para los horizontes superiores.

### **5.3.1 Sección Sísmica Chicx-A**

La línea sísmica Chicx-A, se encuentra localizada en la región noroccidental del cráter (Fig. 5.2) y cuya sección sísmica presenta una dirección W-E; se muestra aproximadamente a partir de los 80 km radiales hacia el centro del cráter como lo muestra la Figura 5.3.

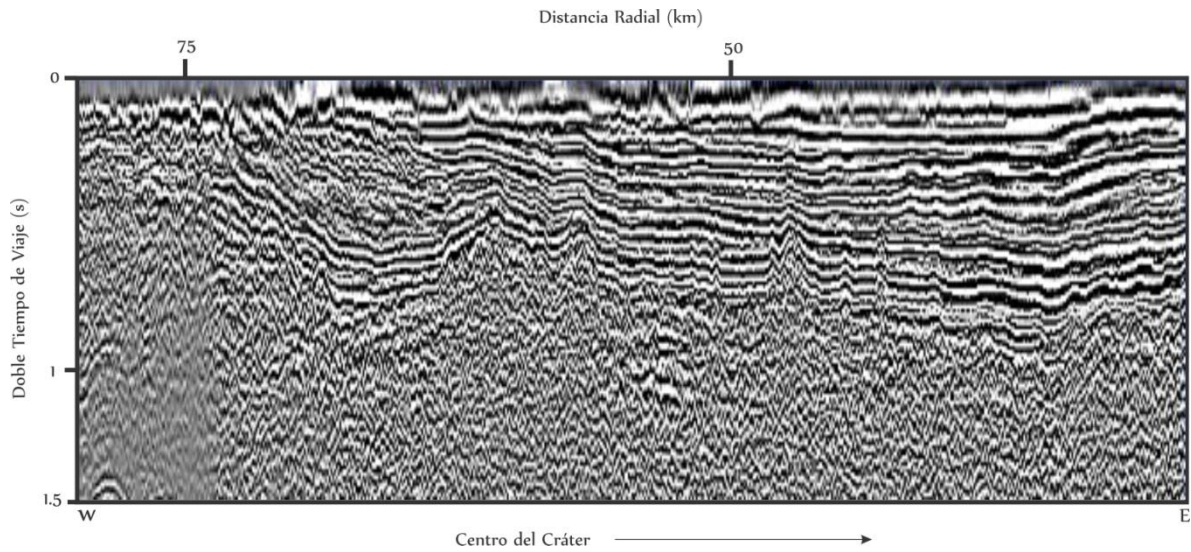


Fig. 5.3 Sección Sísmica Chicx-A. El eje horizontal marca la distancia radial hasta aproximadamente 80 km del centro del cráter, en dirección oeste-este, mientras que el eje vertical representa el doble tiempo de viaje.

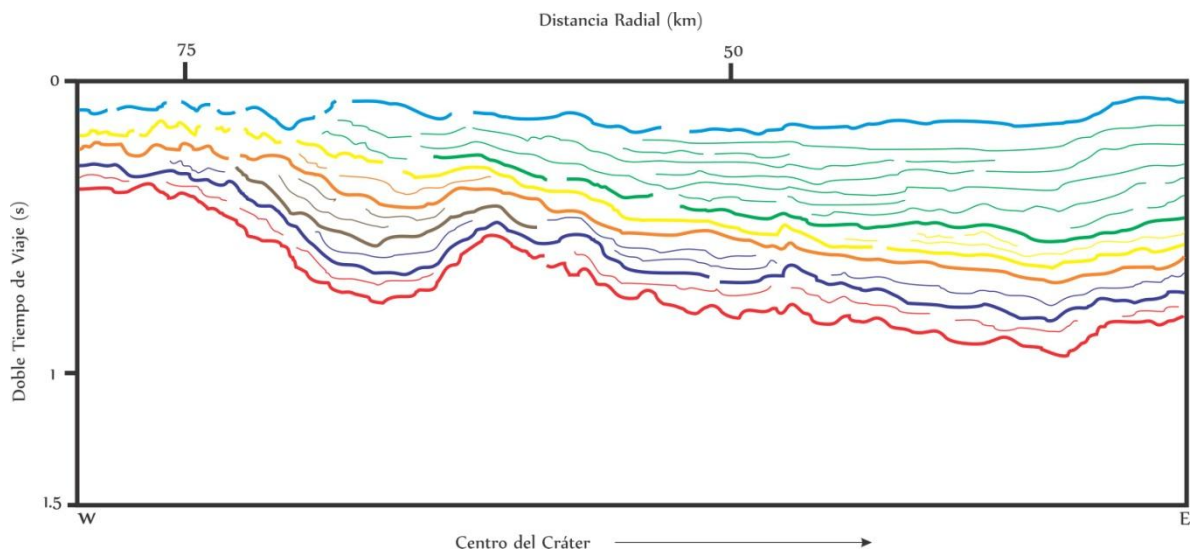


Fig. 5.4 Diagrama de línea correspondiente a la sección sísmica Chicx-A.

En la Fig. 5.4 se muestra el diagrama de línea de la sección sísmica Chicx-A, en el cual se identifican ocho reflectores de mayor energía y se delimitan cinco unidades litoestratigráficas principales.

El horizonte color rojo se observa por arriba del 0.8 segundos en doble tiempo de viaje en la depresión anular en la región occidental del cráter, y el cual alcanza el segundo en doble tiempo de viaje en la cuenca central, lo cual indica un aumento en su profundidad hacia el centro del cráter; su topografía es abrupta y marca el límite K/T.

Sobre el límite K/T se observan tres horizontes (azul marino, naranja y amarillo), cuya continuidad se extiende desde la depresión anular, hasta la cuenca central; estos horizontes siguen la tendencia marcada por el horizonte rojo e inferior. El horizonte superior se muestra discontinuo a lo largo de la depresión anular y continua hacia el centro del cráter en la cuenca central (Fig. 5.4).

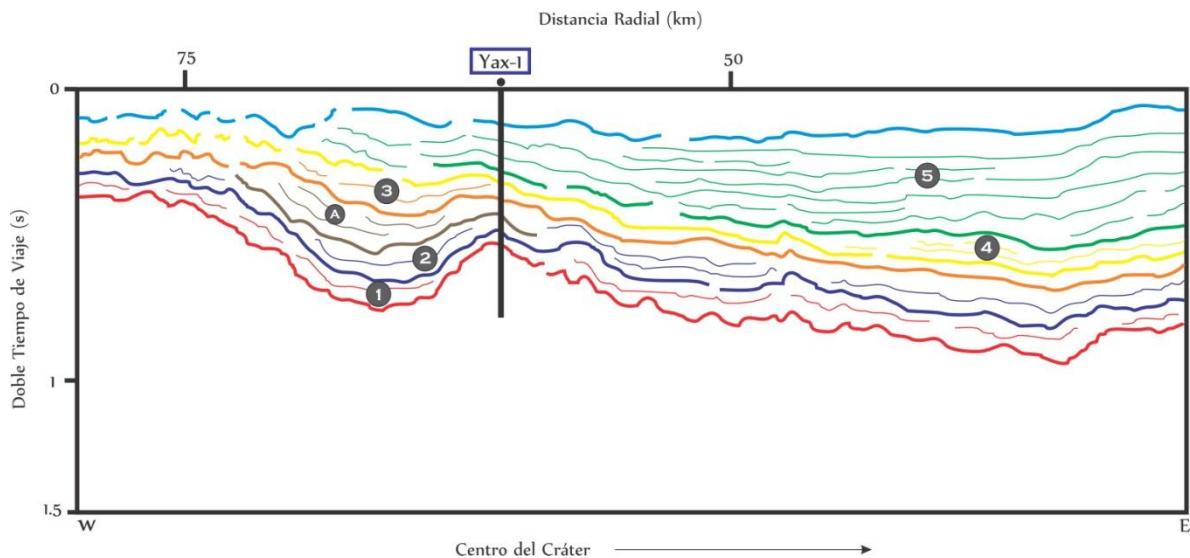


Fig. 5.5 Diagrama de línea correspondiente a la Sección Sísmica Chicx-A con la proyección del pozo Yax-1 a 60 km radiales al centro del cráter. Unidades determinadas a través del análisis de secuencias sísmicas.

La Fig. 5.5 muestra la proyección del pozo Yax-1, hacia la línea Chicx-A, apreciándose los horizontes sísmicos propuestos que interceptan al pozo proyectado.

La unidad 1 y 2 (Fig. 5.5) está conformada por reflectores concordantes con el horizonte rojo, los cuales se extienden hacia el centro del cráter.

La unidad A está compuesta por reflectores clinoformes de baja amplitud, en los cuales se observan discontinuidades, además de que en la depresión anular occidental, se acuñan en el tope de la unidad 2 y margen de la cuenca (horizonte azul marino), indicadores de regresión marina y cambios en el nivel medio del mar.

Las unidades 4 y 5 (Fig. 5.5) están conformadas por reflectores subhorizontales de gran amplitud, los cuales son continuos y se extienden a través de la cuenca central, marcando un cambio en el ambiente de depósito

### 5.3.2 Sección Sísmica Chicx-A1

La línea sísmica Chicx-A1, se encuentra localizada en la región nororiental del cráter (Fig. 5.2) y cuya sección sísmica presenta una dirección W-E; se muestra aproximadamente a partir de los 90 km radiales hacia el centro del cráter como lo muestra la Figura 5.6.

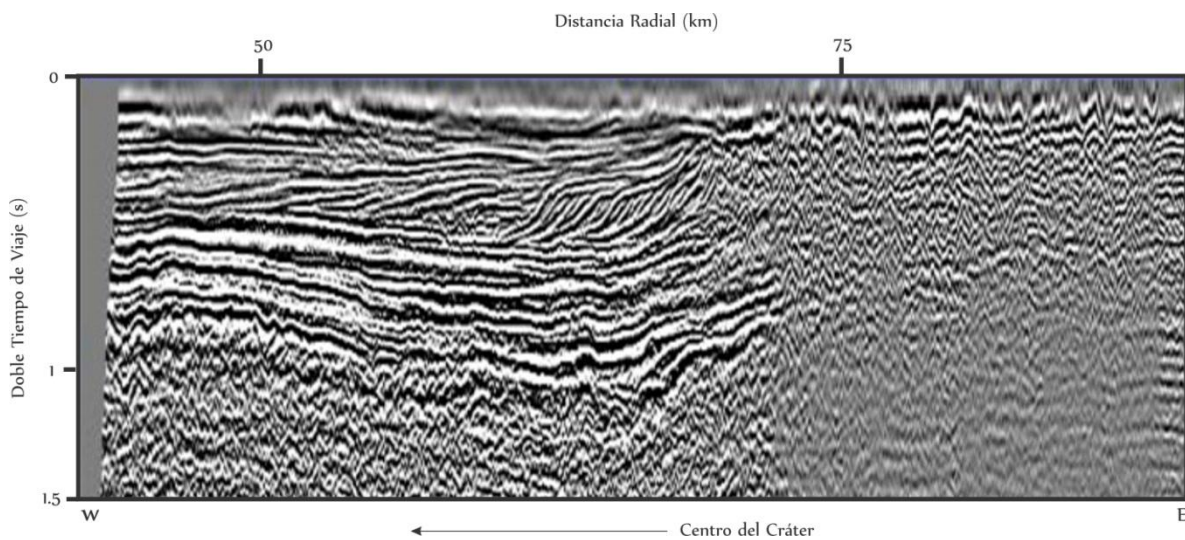


Fig. 5.6 Sección Sísmica Chicx-A1. El eje horizontal marca la distancia radial hasta aproximadamente a 90 km del centro del cráter, mientras que el eje vertical representa el doble tiempo de viaje.

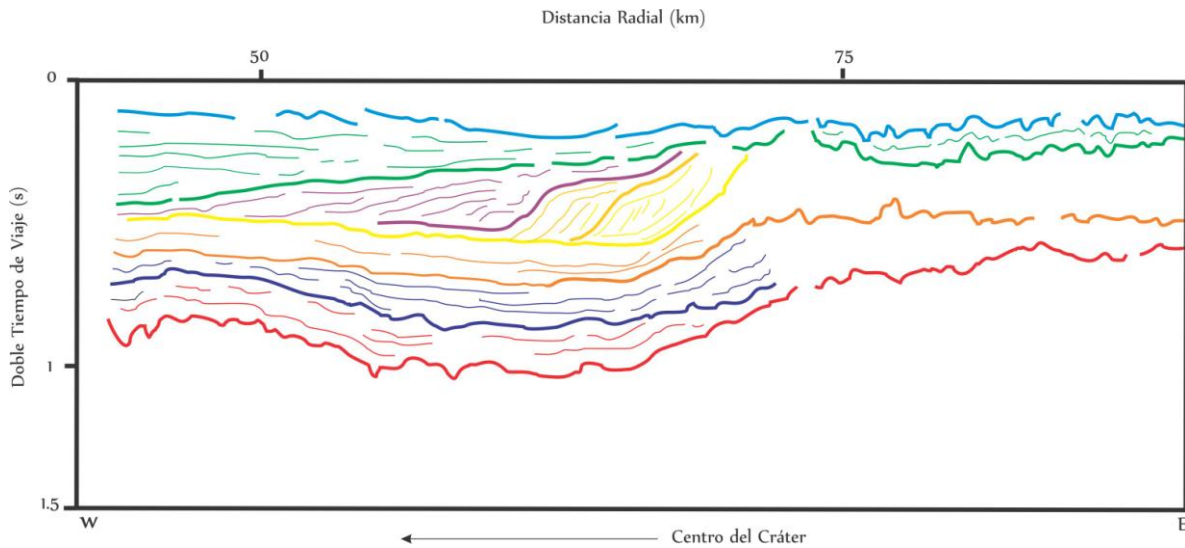


Fig. 5.7 Diagrama de línea correspondiente a la sección sísmica Chicx-A1.

En la Fig. 5.7, se muestra el diagrama de línea de la sección sísmica Chicx-A, en el cual se identifican ocho reflectores de mayor energía, delimitando siete unidades de roca.

El horizonte rojo se observa aproximadamente a un segundo en doble tiempo de viaje en el peak ring y depresión anular en la región oriental del cráter, siguiendo la continuidad de la línea sísmica A; a partir de los 70 km radiales aproximadamente, en la cuenca exterior, el horizonte pierde continuidad. Los horizontes azul y naranja, siguen la tendencia de H1, perdiendo de igual forma continuidad hacia la cuenca exterior.

Los horizontes amarillos, morado y verde delimitan las unidades que marcan cambios en los ambientes de depósito. El horizonte superior se observa discontinuo desde la depresión anular hasta la cuenca exterior y refleja una topografía abrupta.

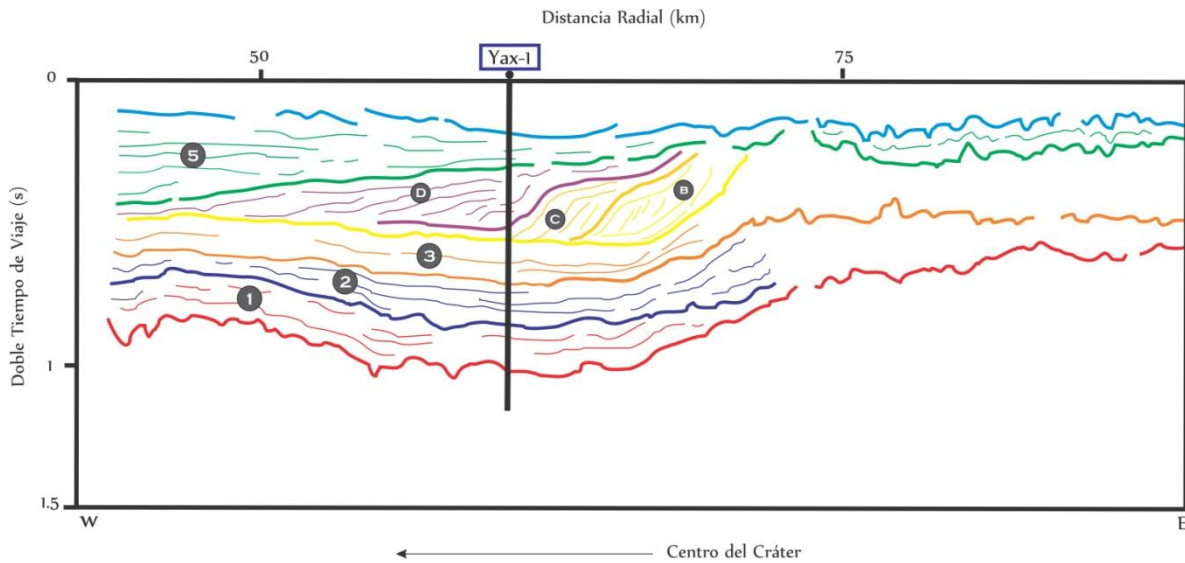


Fig. 5.8 Diagrama de línea correspondiente a la Sección Sísmica Chicx-A1 con la proyección del pozo Yax-1 a 60 km radiales al centro del cráter. Unidades determinadas a través del análisis de secuencias sísmicas.

La Fig. 5.8 muestra la proyección del pozo Yax-1, hacia la línea Chicx-A1, apreciándose los horizontes sísmicos propuestos que interceptan al pozo proyectado.

La unidad 1 (Fig. 5.8) sigue la tendencia de la sección Chicx-A, al estar conformada por reflectores concordantes con H1, que se extienden hacia la depresión anular oriental y el anillo exterior. Las unidades 2 y 3 están compuestas por reflectores discontinuos de baja amplitud, los cuales no se distinguen en la cuenca exterior del cráter.

Las unidades B está conformada por reflectores clinoformes que se empalman uno sobre otro; la geometría de esta unidad es típica de una pendiente progradante, indicando una regresión durante la disminución del nivel del mar. Ésta unidad sobreyace sobre la unidad C, la cual está compuesta también por reflectores clinoformes, pero de menor echado y mostrando cierto paralelismo.



El depósito de estas unidades de cliniformes corresponde a una sedimentación relativamente rápida. Los reflectores por arriba de estas unidades (unidad D), muestran cliniformes que presentan plegamiento y acuñamiento, indicadores de una etapa de sedimentación más pasiva.

Por último la unidad 5 (Fig. 5.8) presenta la misma tendencia y patrón que en la sección A, con reflectores subhorizontales de gran amplitud, los cuales son continuos en la cuenca central.

### 5.3.3 Sección Sísmica Chicx-B

La línea sísmica Chicx-B, se encuentra localizada en la región noroccidental del cráter (Fig. 5.2) y cuya sección sísmica presenta una dirección SE-NW; se muestra aproximadamente a partir de los 80 km radiales hacia el centro del cráter como lo muestra la Figura 5.9.

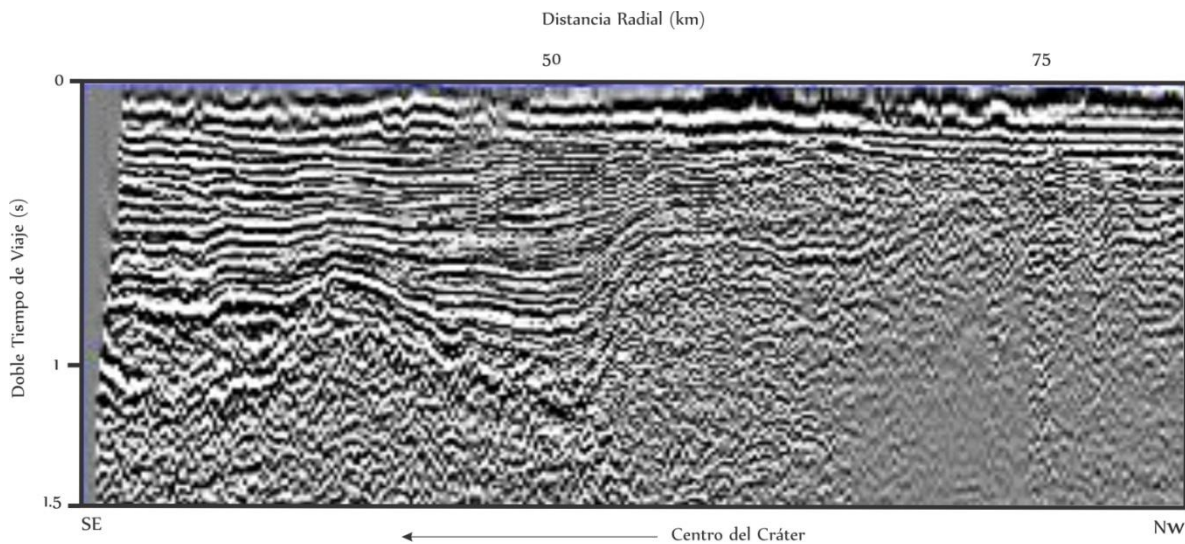


Fig. 5.9 Sección Sísmica Chicx-B. El eje horizontal marca la distancia radial hasta aproximadamente a 80 km del centro del cráter, mientras que el eje vertical representa el doble tiempo de viaje.

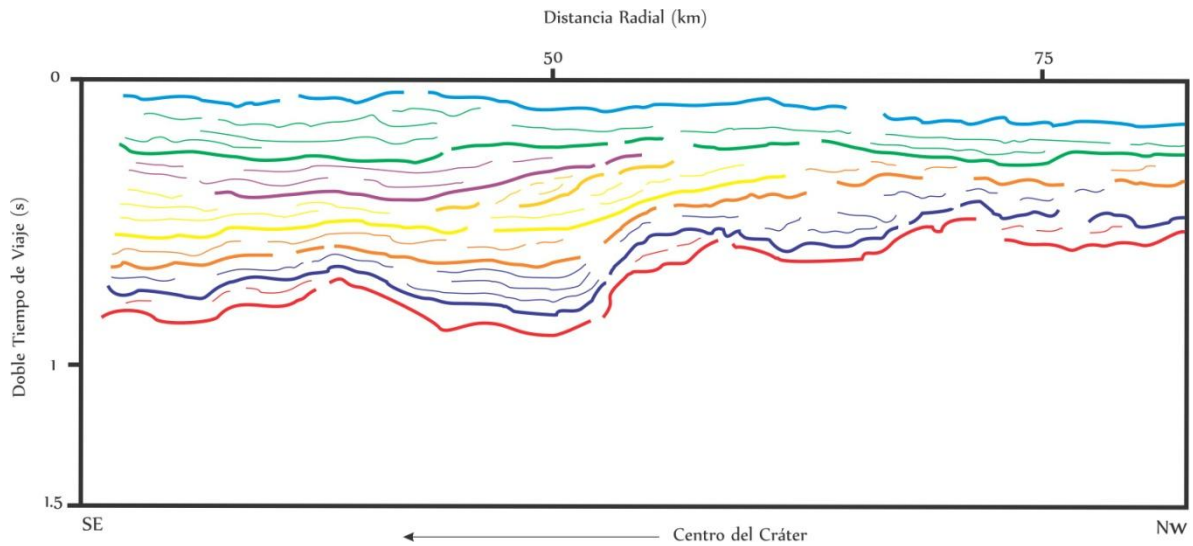


Fig. 5.10 Diagrama de línea correspondiente a la sección sísmica Chicx-B.

En la Fig. 5.10, se muestra el diagrama de línea de la sección sísmica Chicx-B, en el cual se identifican ocho reflectores de mayor energía, delimitando ocho unidades de roca.

El horizonte color rojo se presenta por arriba del segundo en doble tiempo de viaje y disminuye hasta aproximadamente 0.5 segundos en el peak ring y en la depresión anular occidental; tiene continuidad sobre H1, de igual forma que en las secciones Chicx-A y A1; los horizontes azul marino y naranja presentan discontinuidades hacia la depresión anular, al igual que el horizonte superior azul. Los horizontes amarillos, morado y verde delimitan las unidades que marcan cambios en los ambientes de depósito.

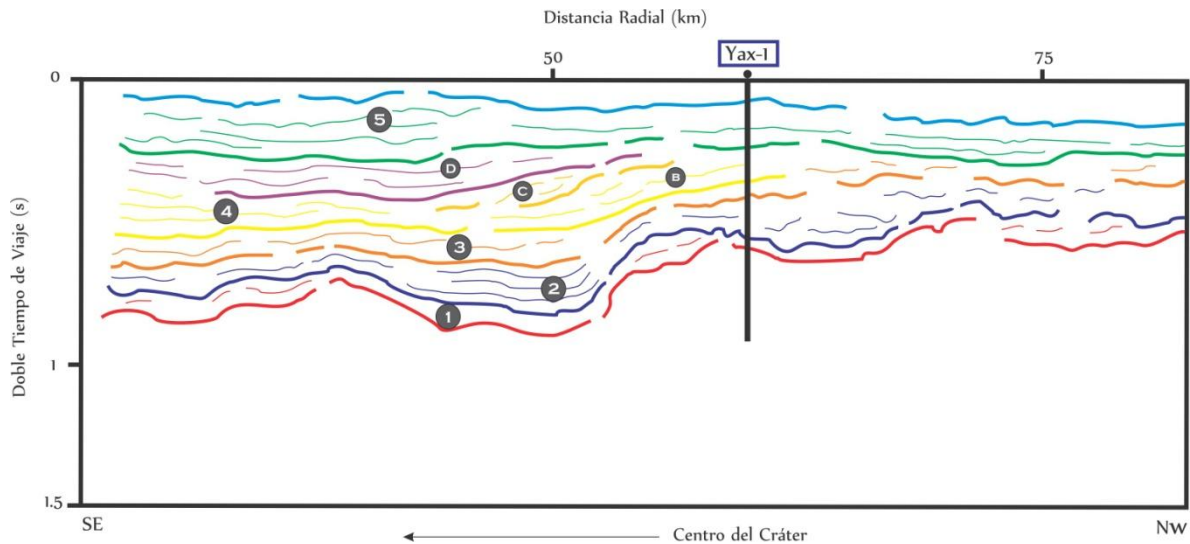


Fig. 5.11 Diagrama de línea correspondiente a la Sección Sísmica Chicx-B con la proyección del pozo Yax-1 a 60 km radiales al centro del cráter. Unidades determinadas a través del análisis de secuencias sísmicas.

La Fig. 5.11 muestra la proyección del pozo Yax-1, hacia la línea Chicx-B, apreciándose los horizontes sísmicos propuestos que interceptan al pozo proyectado.

La unidad 1 (Fig. 5.11) está conformada por reflectores concordantes con H1. Las unidades 2 y 3 están compuestas por reflectores discontinuos de baja amplitud, los cuales no es posible distinguir perfectamente hacia el peak ring y depresión anular occidental. La unidad 5 presenta la misma tendencia que la sección Chicx-A, con reflectores subhorizontales de gran amplitud, los cuales son continuos en la cuenca central.

Las unidades B y C están conformadas por reflectores que se acuñan en los horizontes amarillos, lo que indica regresiones marinas y un cambio deposicional. La unidad D se compone de reflectores que se empalman sobre las unidades inferiores, indicando una transgresión marina y otro cambio en el ambiente de depósito. Estas unidades muestran una geometría de los reflectores similar a la que presentan las unidades B, C y D de la sección sísmica Chicx-A1, pero se diferencian entre sí por las distintas profundidades que alcanzan los reflectores, lo cual es evidente en los tiempos de reflexión como se ha mencionado anteriormente.

### 5.3.4 Sección Sísmica Chicx-C

La línea sísmica Chicx-C, se encuentra localizada en la región nororiental del cráter (Fig.5.2) y cuya sección sísmica presenta una dirección SW-NE; se muestra aproximadamente a partir de los 80 km radiales hacia el centro del cráter como lo muestra la Figura 5.12.

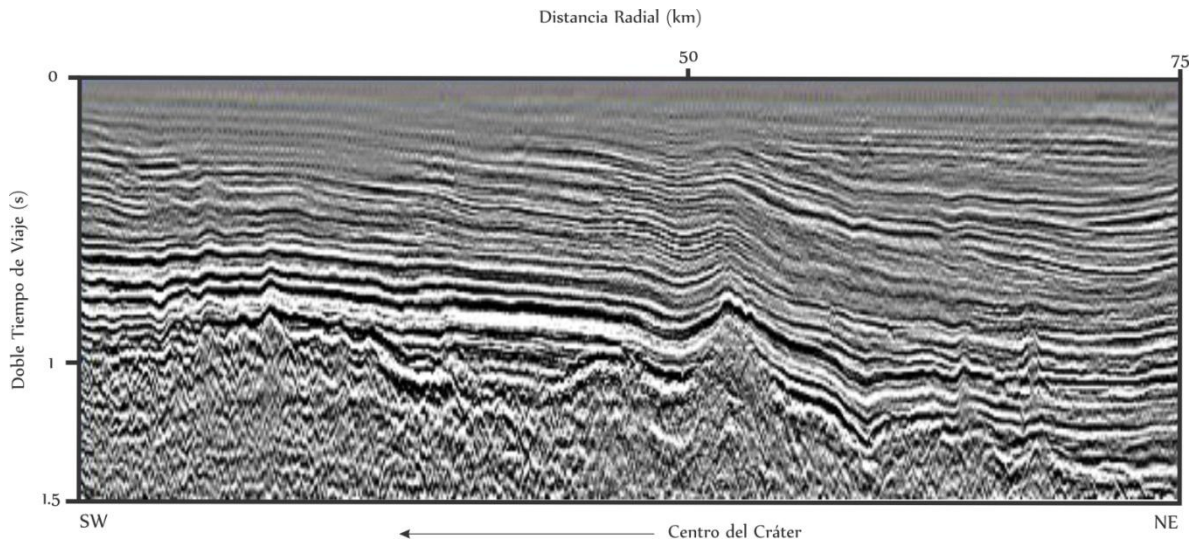


Fig. 5.12 Sección Sísmica Chicx-C. El eje horizontal marca la distancia radial hasta 75 km del centro del cráter, mientras que el eje vertical representa el doble tiempo de viaje.

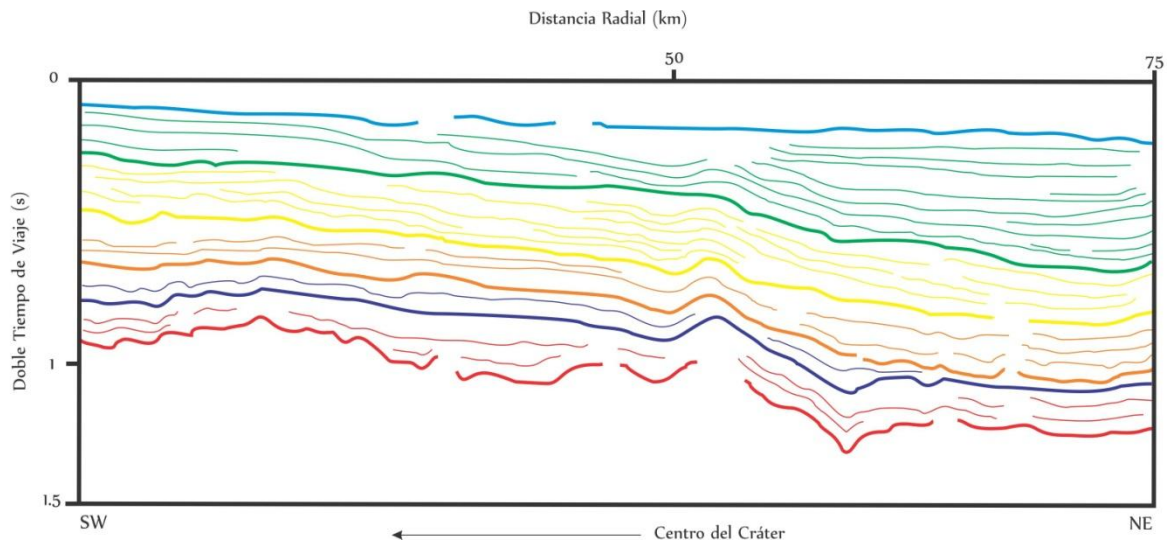


Fig. 5.13 Diagrama de línea correspondiente a la sección sísmica Chicx-C..

En la Fig. 5.13, se muestra el diagrama de línea de la sección sísmica Chicx-C, en el cual se identifican seis reflectores de mayor energía, delimitando cinco unidades de roca.

El horizonte color rojo se presenta por arriba del segundo en doble tiempo de viaje hasta el peak ring, para aumentar hasta aproximadamente 1.3 segundos en la depresión anular de la región oriental del cráter, es discontinuo y presenta una topografía abrupta de igual forma que en las secciones anteriores.

Los horizontes azul marino, naranja, amarillo y verde, son continuos prácticamente a través de la sección, desde la cuenca central hasta la depresión anular. El horizonte azul superior presenta discontinuidades, siguiendo la misma tendencia en las cuatro secciones.

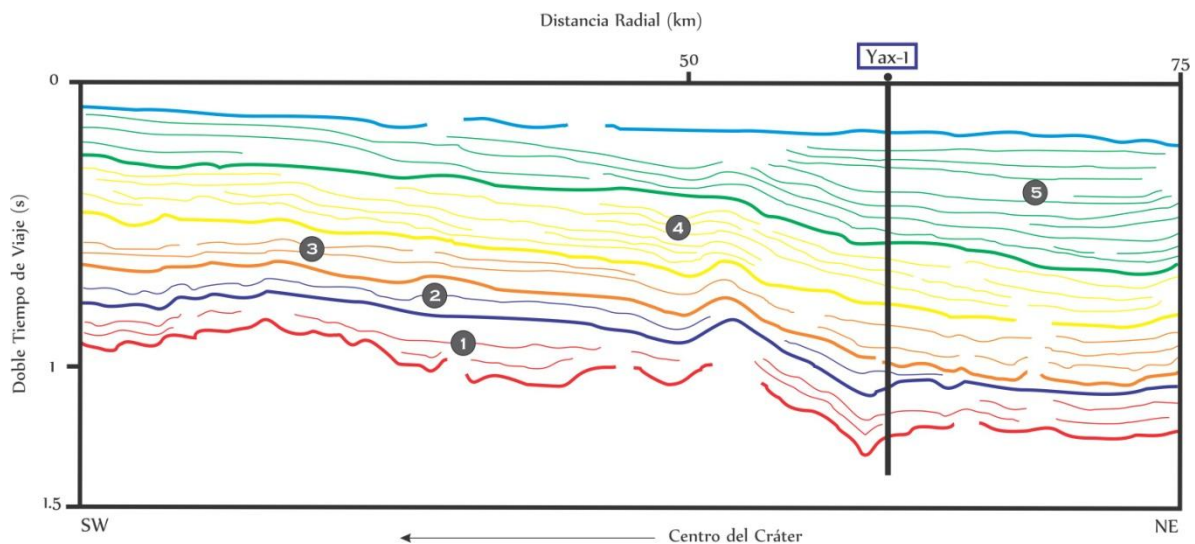


Fig. 5.14 Diagrama de línea correspondiente a la Sección Sísmica Chicx-C con la proyección del pozo Yax-1 a 60 km radiales al centro del cráter. Unidades determinadas a través del análisis de secuencias sísmicas.

La Fig. 5.14 muestra la proyección del pozo Yax-1, hacia la línea Chicx-C, apreciándose los horizontes sísmicos propuestos que interceptan al pozo proyectado.

Las unidades 1 y 2 (Fig. 5.14) están conformadas por reflectores concordantes con el H1; debido a su baja amplitud, no pueden seguirse completamente a través de la sección. Las unidades 4 y 5 están compuestas por reflectores continuos de baja amplitud subhorizontales, los cuales delimitan bien ambas unidades y los cambios en los ambiente de depósito, determinados también en las secciones anteriores.

## 6. ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDADES

---

---

### 6.1 Primera Aproximación

De acuerdo a la suposición de simetría en el cráter, a partir de las características de los cráteres de impacto y de los estudios gravimétricos realizados en el cráter, los cuales revelan una anomalía de Bouguer semicircular concéntrica definida, o la interferometría que refleja una depresión topográfica semicircular (Urrutia-Fucugauchi et al., 2010), se realiza una primera estimación de las profundidades de los reflectores sísmicos de mayor energía, determinados a partir del análisis estratigráfico de las secciones sísmicas, considerando una simetría radial, así como la profundidad del contacto entre las brechas de impacto y las rocas carbonatadas a 795 metros.

El modelo de velocidades empleado para la primera aproximación de la conversión de los tiempos de reflexión a profundidades, es un modelo lineal, el cual considera que la velocidad de propagación de onda varía constantemente con la profundidad.

Las estimaciones se obtienen primeramente a través del cálculo de la velocidad en términos de dos parámetros, por medio de la siguiente ecuación, donde  $d$  es la profundidad del horizonte y  $t$  su doble tiempo de viaje.

$$v = \frac{d}{t}$$

Estos parámetros son conocidos para el horizonte inferior de las secciones sísmicas, tomando el tiempo de viaje directamente de la sección, y una distancia de 795 metros, la cual es conocida como la profundidad del contacto entre las rocas carbonatadas del Paleógeno y las brechas de impacto del Cretácico.

### 6.1.1 Sección Sísmica Chicx-A

A través del análisis estratigráfico se delimitan siete horizontes sísmicos, los cuales separan en seis paquetes a la secuencia carbonatada del Paleógeno (Fig. 5.4 y 6.1).

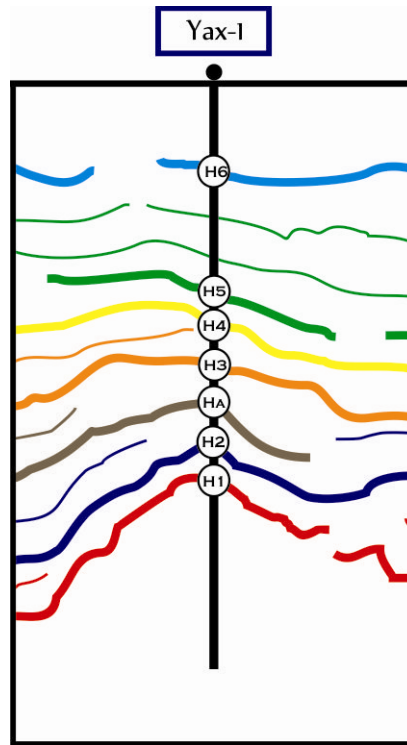


Fig. 6.1 Pozo Yaxcopoil-1 proyectado a la línea Chicx-A. Se muestran los horizontes sísmicos propuestos (H1-H6).

El horizonte sísmico rojo ubicado por debajo de 0.5 segundos en doble tiempo de viaje (H1), corresponde al contacto entre brechas de impacto y carbonatos. Para dicho horizonte se tiene una profundidad de 795 metros y un doble tiempo de viaje de 0.58 segundos, por lo que la velocidad de propagación de la onda P es de 1.37 km/s.

La velocidad obtenida para el horizonte H1, es una velocidad mínima de los estratos del Paleógeno, asumiéndose además, que la velocidad no cambia significativamente con la profundidad.

Se obtiene el cálculo de las profundidades para los cinco horizontes superiores, a partir de una velocidad promedio de 1.37 km/s y los dobles tiempos de reflexión para cada horizonte de la sección



sísmica Chicx-A. La tabla 3 muestra las profundidades para los seis horizontes sísmicos que interceptan al Yax-1:

<b>Yax – 1 (Sección Chicx-A)</b>		
<b><math>V_{\text{mín}} = 1.37 \text{ km/s}</math></b>		
<b>Horizonte</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Profundidad (m)</b>
H6	0.11	151
H5	0.27	370
H4	0.32	439
H3	0.38	521
HA	0.43	589
H2	0.50	685
H1	0.58	795

Tabla 3 Profundidades de las capas reflectoras para el pozo Yax-1 (Sección Chicx-A).

### 6.1.2 Sección Sísmica Chicx-A1

A través del análisis estratigráfico se delimitan siete horizontes sísmicos, los cuales separan en seis paquetes a la secuencia de carbonatos del Paleógeno (Fig. 5.7 y 6.2), número de paquetes coincidente con la sección Chicx-A.

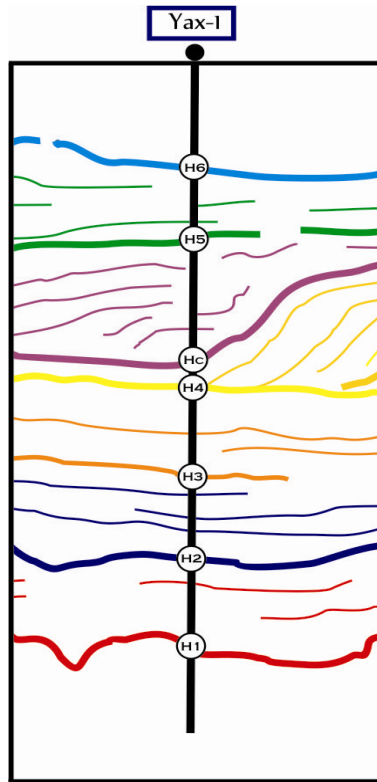


Fig. 6.2 Pozo Yaxcopoil-1 proyectado a la línea Chicx-A1. Se muestran los horizontes sísmicos propuestos (H1-H6).

Se obtiene el cálculo de las profundidades para los cinco horizontes superiores, a partir de la velocidad promedio de 0.77 km/s determinada y los dobles tiempos de viaje para cada horizonte. En la tabla 4 muestra las profundidades para los seis horizontes sísmicos que interceptan al Yax-1:

<b>Yax – 1 (Sección Chicx-A1)</b>		
<b><math>V_{\text{mín}} = 0.77 \text{ km/s}</math></b>		
<b>Horizonte</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Profundidad (m)</b>
H6	0.21	162
H5	0.32	247
HC	0.51	394
H4	0.59	455
H3	0.69	533
H2	0.87	672
H1	1.03	795

Tabla 4 Profundidades de las capas reflectoras para el pozo Yax-1 (Sección Chicx-A1).

### 6.1.3 Sección Sísmica Chicx-B

Se delimitan ocho horizontes sísmicos tras el análisis estratigráfico, los cuales separan en ocho paquetes a la secuencia de carbonatos del Paleógeno (Fig. 5.10 y 6.3).

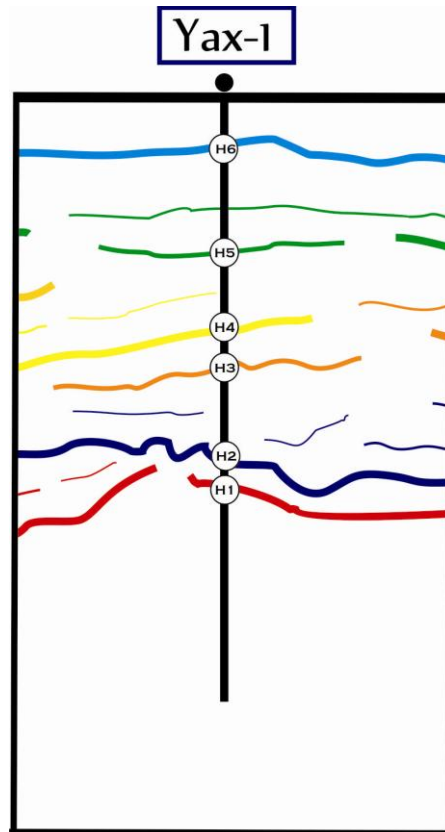


Fig. 6.3 Pozo Yaxcopoil-1 proyectado a la línea Chicx-B. Se muestran los horizontes sísmicos propuestos (H1-H6).

Se obtiene el cálculo de las profundidades para los cinco horizontes superiores, a partir de la velocidad promedio de 0.77 km/s y los dobles tiempos de viaje para cada horizonte de la sección sísmica Chicx-B. La tabla 5 muestra las profundidades para los seis horizontes sísmicos que interceptan al Yax-1:

Yax – 1 (Sección Chicx-B)		
V <sub>mín</sub> = 1.39 km/s		
Horizonte	Tiempo (s)	Profundidad (m)
H6	0.06	88
H5	0.21	293
H4	0.33	460
H3	0.39	544
H2	0.54	753
H1	0.57	795

Tabla 5 Profundidades de las capas reflectoras para el pozo Yax-1 (Sección Chicx-B).

#### 6.1.4 Sección Sísmica Chicx-C

A través del análisis estratigráfico se delimitan ocho horizontes sísmicos, los cuales separan en ocho paquetes a la secuencia de carbonatos del Paleógeno (Fig. 5.13 y 6.4).

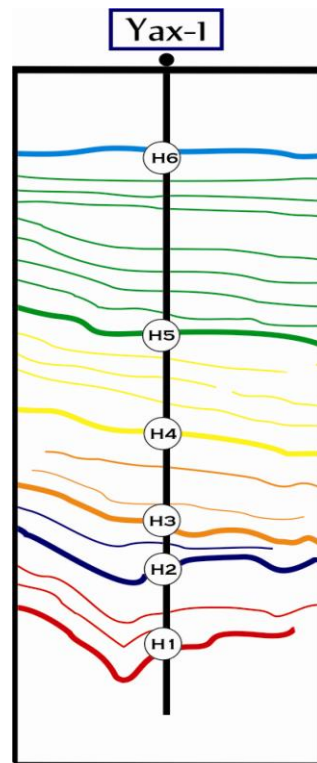


Fig. 6.4 Pozo Yaxcopoil-1 proyectado a la línea Chicx-C. Se muestran los horizontes sísmicos propuestos (H1-H6).

Se obtiene el cálculo de las profundidades para los cinco horizontes superiores, a partir de la velocidad promedio de 0.77 km/s y los dobles tiempos de viaje para cada horizonte de la sección sísmica Chicx-C.

La tabla 6 muestra las profundidades para los seis horizontes sísmicos que interceptan al Yax-1:

<b>Yax – 1 (Sección Chicx-C)</b>		
<b>V<sub>mín</sub> = 0.65 km/s</b>		
<b>Horizonte</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Profundidad (m)</b>
H6	0.15	97
H5	0.54	349
H4	0.76	491
H3	0.98	633
H2	1.07	692
H1	1.23	795

Tabla 6 Profundidades de las capas reflectoras para el pozo Yax-1 (Sección Chicx-C).

## 6.2 Segunda Aproximación

Para realizar la conversión a profundidad de los tiempos de reflexión en una sección migrada en tiempo, es necesaria la formulación de una ley de velocidades (modelo de velocidades), la cual resulta de la inversión de velocidades conveniente y establecida. A través del modelo se determinan las profundidades de los reflectores sísmicos del subsuelo a partir de la velocidad de propagación de la onda.

El modelo de velocidades aplicado para obtener una segunda aproximación de las profundidades de los horizontes sísmicos, es un modelo inicial 1D (Vermeesch et al., 2009), el cual es una mejora del modelo 3D, obtenido a partir de la campaña de 1996 y desarrollado de acuerdo a las características litológicas de la parte central del cráter por Morgan et al. (2000), a través de datos del pozo Yax-1.

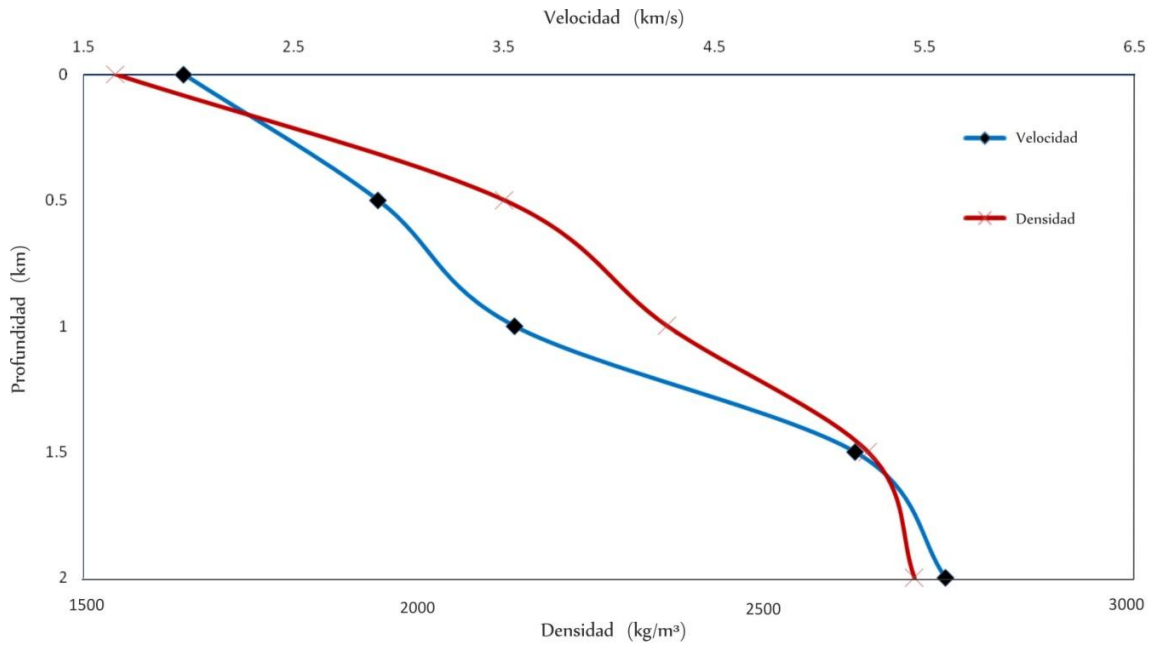


Fig. 6.5 Modelo inicial 1D. La curva azul representa el modelo de velocidades hasta 2 km de profundidad, mientras que la curva roja, el modelo de densidades. Imagen modificada de Vermeesch, P., Morgan, J., et al., 2009, Three dimensional joint inversion of traveltimes and gravity data across the Chicxulub impact crater, Journal of Geophysical Research, Vol. 114, p. 14.

La Fig. 6.5 representa el modelo inicial 1D hasta una profundidad de 2 km, en el cual se observa el modelo de velocidades, el cual presenta una velocidad inicial aproximada de 2 km/s, la cual se incrementa hasta los 5.5 km/s. Además presenta un modelo de densidades, generado a partir de un modelo de lentitud, que a su vez es calculado como el inverso del modelo de velocidades.

### 6.2.1 Sección Sísmica Chicx-A

A través del modelo inicial 1D (Fig. 6.5), se establecen las profundidades de los siete horizontes sísmicos propuestos para la sección Chicx-A (Fig. 5.4 y 6.1), a partir del horizonte 1 (H1), a una profundidad de 795 metros y una velocidad aproximada de 3.25 km/s.

La tabla 7 muestra las profundidades para cada horizonte sísmico propuesto, con su velocidad de propagación respectiva.

<b>Yax – 1 (Sección Chicx-A)</b>		
<b>Horizonte</b>	<b>Velocidad (km/s)</b>	<b>Profundidad (m)</b>
H6	2.33	185
H5	2.78	425
H4	2.83	460
H3	2.90	500
HA	3.04	610
H2	3.13	695
H1	3.25	795

Tabla 7 Profundidades de los horizontes sísmicos para el pozo Yax-1 (Sección Chicx-A), aplicando el modelo inicial 1D (Vermeesch et al., 2009).

### 6.2.2 Sección Sísmica Chicx-A1

A través del modelo inicial 1D (Fig. 6.5), se establecen las profundidades de los siete horizontes sísmicos propuestos para la sección A1 (Fig. 5.7 y 6.2), partiendo del horizonte 1 (H1), a una profundidad de 795 metros y una velocidad aproximada de 3.25 km/s.

La tabla 8 muestra las profundidades para cada horizonte sísmico propuesto, con su velocidad de propagación respectiva.

<b>Yax – 1 (Sección Chicx-A1)</b>		
<b>Horizonte</b>	<b>Velocidad (km/s)</b>	<b>Profundidad (m)</b>
H6	2.32	170
H5	2.47	270
HC	2.78	420
H4	2.88	480
H3	2.98	555
H2	3.12	680
H1	3.25	795

Tabla 8 Profundidades de los horizontes sísmicos para el pozo Yax-1 (Sección Chicx-A1), aplicando el modelo inicial 1D (Vermeesch et al., 2009).

### 6.2.3 Sección Sísmica Chicx-B

Se establecen las profundidades de los seis horizontes sísmicos propuestos para la sección Chicx-B (Fig. 5.10 y 6.3), partiendo del horizonte 1 (H1), a una profundidad de 795 metros y una velocidad aproximada de 3.25 km/s.

La tabla 9 muestra las profundidades para cada horizonte sísmico propuesto, con su velocidad de propagación respectiva.

<b>Yax – 1 (Sección Chicx-B)</b>		
<b>Horizonte</b>	<b>Velocidad (km/s)</b>	<b>Profundidad (m)</b>
H6	2.23	110
H5	2.55	295
H4	2.89	480
H3	2.98	550
H2	3.20	755
H1	3.25	795

Tabla 9 Profundidades de los horizontes sísmicos para el pozo Yax-1 (Sección Chicx-B), aplicando el modelo inicial 1D (Vermeesch et al., 2009).



## 6.2.4 Sección Sísmica Chicx-C

Finalmente se establecen las profundidades de los seis horizontes sísmicos propuestos para la sección Chicx-C (Fig. 5.13 y 6.4), partiendo de igual forma del horizonte 1 (H1), a una profundidad de 795 metros y una velocidad aproximada de 3.25 km/s.

La tabla 10 muestra las profundidades para cada horizonte sísmico propuesto, con su velocidad de propagación respectiva.

<b>Yax – 1 (Sección Chicx-C)</b>		
<b>Horizonte</b>	<b>V<sub>máx</sub> (km/s)</b>	<b>Profundidad (m)</b>
H6	2.17	90
H5	2.65	350
H4	2.89	495
H3	3.06	625
H2	3.12	680
H1	3.25	795

Tabla 10 Profundidades de los horizontes sísmicos para el pozo Yax-1 (Sección Chicx-C), aplicando el modelo inicial 1D (Vermeesch et al., 2009).

## 7. DISCUSIÓN

---

---

Las secciones sísmicas se presentan en tiempo, en términos de doble tiempo de viaje. Las profundidades en las secciones sísmicas pueden estimarse por medio de la migración a profundidad. El proceso de migración a profundidad requiere de un modelo de velocidades, a partir del análisis de los datos sísmicos, registros geofísicos de pozo, perfiles sísmicos verticales o modelos asumidos de velocidad.

Los análisis de datos sísmicos emplean diferentes métodos y algoritmos, incluyendo los métodos de Kirchoff de migración a profundidad pre-apilamiento, migración de ecuación de onda, etc., (Berkhout, 1985; Rickett y Sava, 2002). La calidad de las secciones migradas a profundidad está limitada por la precisión del modelo de velocidades.

El control de velocidades en los medios estratificados depende de diversos factores relacionados a la propagación de onda, geometría, propiedades petrofísicas y fenómenos de difracción, scattering, anisotropía, etc., (Berkhout, 1985; Grech y Lawton, 2001).

Para este estudio, se analiza un método alternativo empleando análisis de núcleos, determinando horizontes, para la correlación con los reflectores de las secciones sísmicas. El análisis de los cambios litológicos en los núcleos y la caracterización de las formaciones proporcionan información detallada sobre la estratigrafía, la cual permite una correlación y mayor control en la interpretación de los datos sísmicos.

El uso combinado de los registros de pozo y análisis de núcleos permite la estimación de profundidades de los horizontes y permite una interpretación sobre los contrastes de impedancia en la sección y cambios en las propiedades petrofísicas que tengan respuesta en reflexión.

## Contacto Brechas de Impacto y Carbonatos del Paleógeno

Para determinar el amarre de las secciones sísmicas migradas en tiempo y los registros de las propiedades petrofísicas de los núcleos de perforación, se toma como referencia el contacto litoestratigráfico entre las brechas de impacto del Cretácico (Fig. 7.1d) y las rocas carbonatadas del Paleoceno (Fig. 7.1c), el cual se encuentra situado a una profundidad de 795 metros en el pozo Yax-1 (Fig. 7.1a).

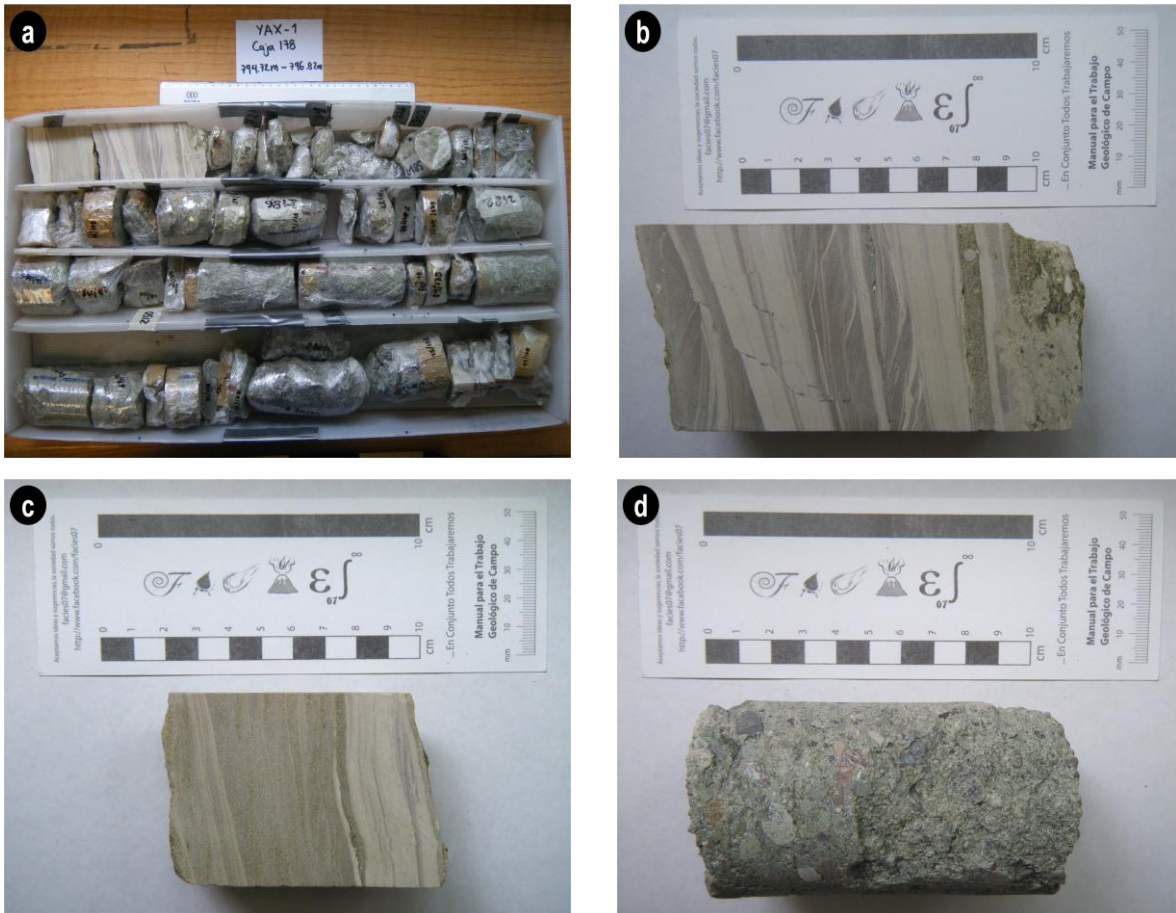


Fig. 7.1 a) Fotografía de la caja 178, conteniendo los núcleos de perforación de los 794.72m a 796.82m; se observa el cambio litológico de caliza dolomítica a brecha de impacto suevítica. b) Contacto litoestratigráfico aproximadamente a 795m de profundidad. c) Fragmento de caliza dolomítica v bandeamiento de bentonita aproximadamente a 794.8m. d) Fragmento de brecha polimictica aproximadamente a 796m.

El contacto litoestratigráfico a los 795 metros de profundidad, se asume como un amarre inicial para las secciones sísmicas, a partir del cual, se estiman la demás profundidades de los horizontes superiores propuestos.

Debido a que en el pozo Yax-1, se realizó recuperación continua de núcleos a partir de los 400 metros y hasta los 1511 metros de profundidad, el amarre de las secciones se realiza para los horizontes sísmicos que de acuerdo a las profundidades estimadas, se encuentran por debajo de los 400 metros.

### **Correlación de Registros de Propiedades Petrofísicas**

Al hacer una comparación de los registros de densidad y velocidad de onda P, obtenidos a partir de las mediciones realizadas a los núcleos de perforación, es posible separar dichos registros en diferentes secciones, de acuerdo a la tendencia de la propiedad en el registro.

En la Fig. 7.2 se muestran los registros de densidad y velocidad de onda P y su correlación, en donde se puede observar que las variaciones de densidad y velocidad en función de la profundidad son similares en todo el intervalo (desde los 400 metros hasta los 670 metros), por lo que presenta una alta correlación, separando ambos registros en tres secciones o paquetes.

Las profundidades en las que se sitúan los cambios y variaciones mayores de densidad y velocidad, son muy semejantes, por lo que se establecen posibles contactos litoestratigráficos a dichas profundidades.

En el registro se separaran tres secciones: la sección 1 entre aproximadamente los 400 y 535 metros, la sección 2 entre 535 y 605 metros y la 3 entre 605 y 670 metros, las cuales están caracterizadas por tendencias distintas en las velocidades de los estratos (Fig. 7.2 y Tabla 11).

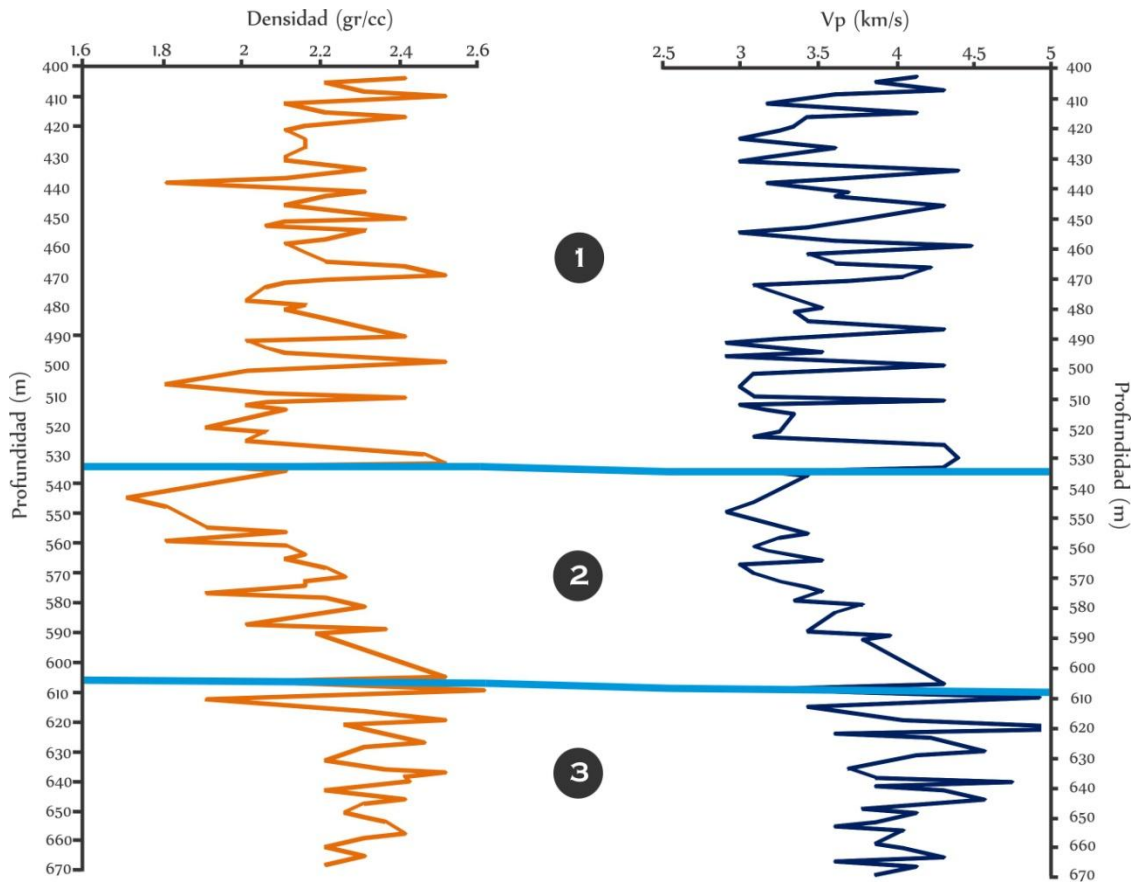


Fig. 7.2 Correlación de los registros de densidad ( $\rho$ ) y velocidad de onda P ( $V_p$ ).

Sección	Profundidad (m)
1	400 - 535
2	535 - 605
3	605 - 670

Tabla 11 Profundidades de los paquetes establecidos a través de la correlación de registros.

En el registro de densidad (Fig. 4.5 y 7.3), la sección e intervalo 1, de los 400 a 535 metros, es posible separarla a su vez, en tres secciones más, debido a las tendencias que se presentan en los datos; éstas tendencias no son apreciables en el registro de  $V_p$ , en el cual solo se identifica una sola sección, por lo que no es posible correlacionarlos, sin embargo se tomarán en cuenta para el amarre de algunos horizontes sísmicos.

La sección 1 (400-535 metros), se separa en tres subsecciones: la 1A entre 400 y 435 metros cuya media es 2.2 gr/cc, la 1B entre 435 y 505 metros en la cual la densidad decrece ligeramente de 2.2 a 1.8 gr/cc, y la 1C entre 505 y 535 metros cuya media es de 2.3 gr/cc; estas subsecciones también están caracterizadas por tendencias similares en las densidades (Fig. 7.3).

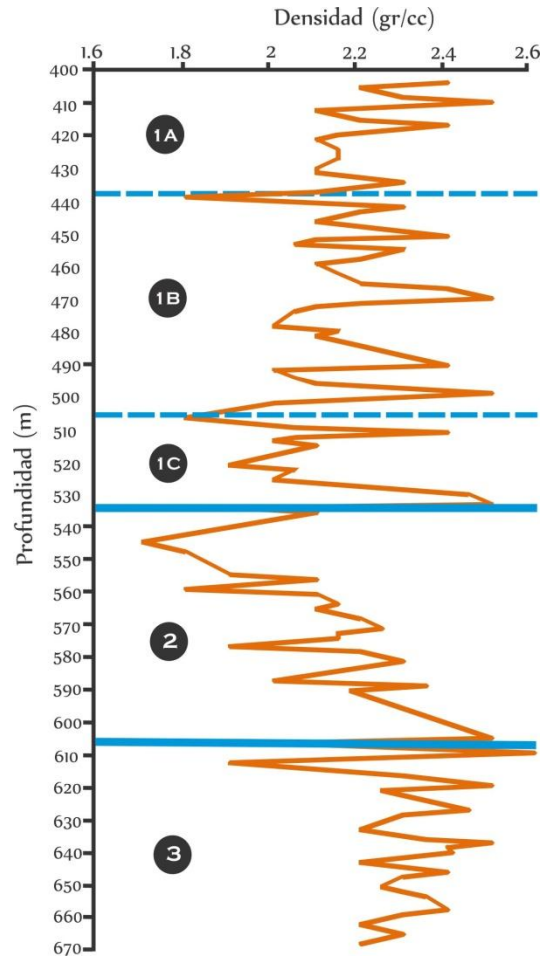


Fig. 7.3 Registro de densidad ( $\rho$ ) y su separación en secciones.

Cada una de las secciones definidas a partir de la correlación de los registros y las tendencias distintivas de la propiedad ( $\rho/V_p$ ), se correlacionan con la columna litoestratigráfica de Escobar (2011) empleada en este estudio, la cual se divide en 12 unidades de acuerdo a la litología y a las relaciones estratigráficas presentes (Fig. 4.3).

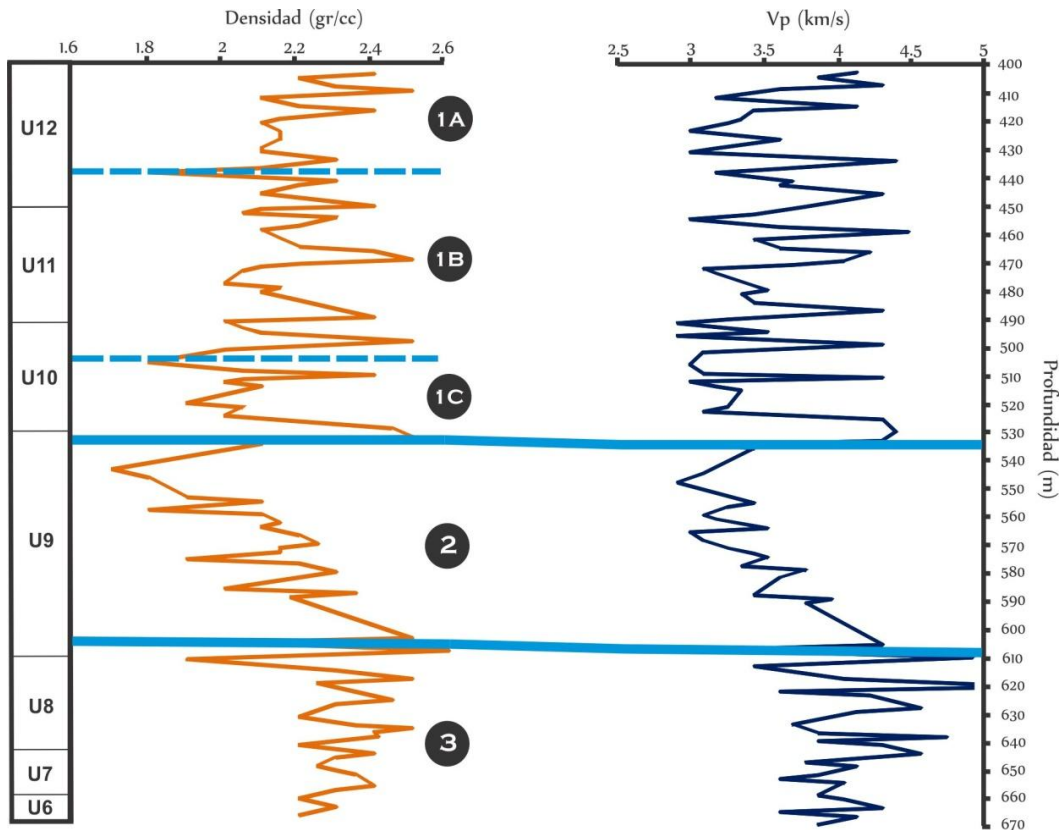


Fig. 7.4 Correlación de registros y unidades litoestratigráficas (Escobar, 2011), para la sección del Paleógeno.

Para la sección 3, se observa una correlación con las unidades 6, 7 y 8, las cuales están conformadas por secuencias de calcarenita, lutitas y caliza de tipo conglomerático y limoso, desde los 605 a los 670 metros que abarcan los registros. La sección 2 tiene una amplia correlación con la unidad 9, en la cual se observa una intercalación de caliza tipo wackestone y calcarenita, cuyos espesores son delgados, así como estratos de caliza limosa y calcarenita de espesores mayores a 15 metros.

La sección 1C puede correlacionarse con la unidad 10, la cual abarca de los 497 a 537 metros aproximadamente, y la cual está compuesta por una intercalación de estratos delgados de calcarenita, caliza limosa y lutitas. La sección 1B abarca desde las unidades 10 y 12, aunque correlaciona enteramente con la unidad 11, compuesta por estratos de caliza wackestone silificada de espesor grueso, además de calcarenita cuya laminación es paralela. Finalmente la sección 1A correlaciona con la unidad 12, de 400 a 435 metros; esta unidad se compone de una secuencia de calcarenita y caliza wackestone, limosa y silificada, cuyos estratos son de espesor delgado.

## Modelos de Velocidades

A través de la generación de un modelo de velocidades, es posible convertir los tiempos de viaje a profundidad. Tal modelo está delimitado por la consideración de los efectos de anisotropía, la geología del medio y por la estimación de las velocidades, debido a que esto repercutirá en el amarre de los pozos a profundidad.

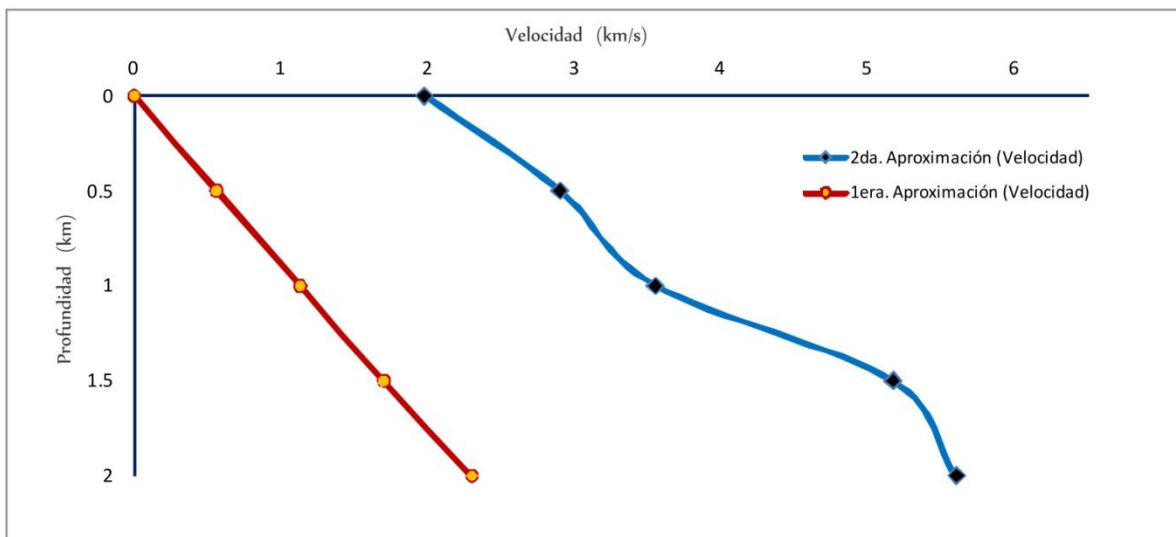


Fig. 7.5 Modelos de velocidad empleados para la estimación de profundidades de los horizontes sísmicos. La curva roja representa el modelo lineal para la primera aproximación; la curva azul representan el modelo inicial 1D (Vermeesch et al., 2009).

La primera aproximación representa un modelo de velocidades lineal, en el cual la velocidad se incrementa constantemente conforme la profundidad aumenta, y que representa además la velocidad de propagación mínima del frente de onda incidente en las interfases del subsuelo. A través de esta primera aproximación es posible obtener un rango de profundidades de los horizontes, a partir de los cuales se definen las profundidades de amarre.

Por otro lado, la segunda aproximación, muestra un modelo cuyas velocidades más bajas son alrededor de 2 km/s y que a partir de 1.5 km en profundidad, se incrementan rápidamente; caso opuesto al modelo lineal, representa la velocidad de propagación máxima, con lo cual es posible obtener el rango de velocidades para el área en cuestión, hasta una profundidad de 2 km (Fig. 7.5).



Este es un modelo de velocidades mejorado por Veermesch et al. (2009), para la parte central del cráter, a partir de datos del pozo Yax-1, con el cual se infieren algunas características del cráter, como son:

- Existencia de brechas entre las rocas del Terciario y las de fusión, las cuales tienen una velocidad entre 5.8 y 6 km/s.
- Posible levantamiento central en forma cóncava hacia arriba, con una velocidad mayor a 6.2 km/s, la cual está relacionada a las rocas de fusión.
- El levantamiento central se hace angosto conforme la profundidad aumenta.
- El peak ring en la región occidental es un área de bajas velocidades, lo que se relaciona con la megabrecha.

## **7.1 Amarre Sección Sísmica Chicx-A**

A través del análisis estratigráfico de secuencias de la sección sísmica Chicx-A, se establecieron ocho horizontes sísmicos (Fig. 5.4), de los cuales siete interceptan al pozo Yax-1, al proyectar éste hacia la línea sísmica correspondiente (Fig. 5.5). A partir del amarre inicial a 795 metros (H1), de la correlaciones de los registros de densidad y velocidad de onda P, y de la columna litoestratigráfica de Escobar (2011), se obtiene el amarre para los horizontes H5, H4, H3, HA y H2 (Fig. 7.6).

La línea continua negra, representa el amarre inicial de la sección y contacto entre las brechas y carbonatos, a partir del cual se estiman profundidades de los horizontes superiores; la línea continua azul, representa el amarre definido a partir de la columna y la correlación de los registros ( $\rho$  y  $V_p$ ). Las líneas discontinuas azules, marcan el amarre definido por las secciones establecidas para el registro de  $\rho$  (400 - 535m), mientras que las líneas punteadas representan el amarre de la sección a partir únicamente de la columna litoestratigráfica (Fig. 7.5). Estos patrones en las líneas para el amarre de la sección Chicx-A, se repiten para las demás secciones.

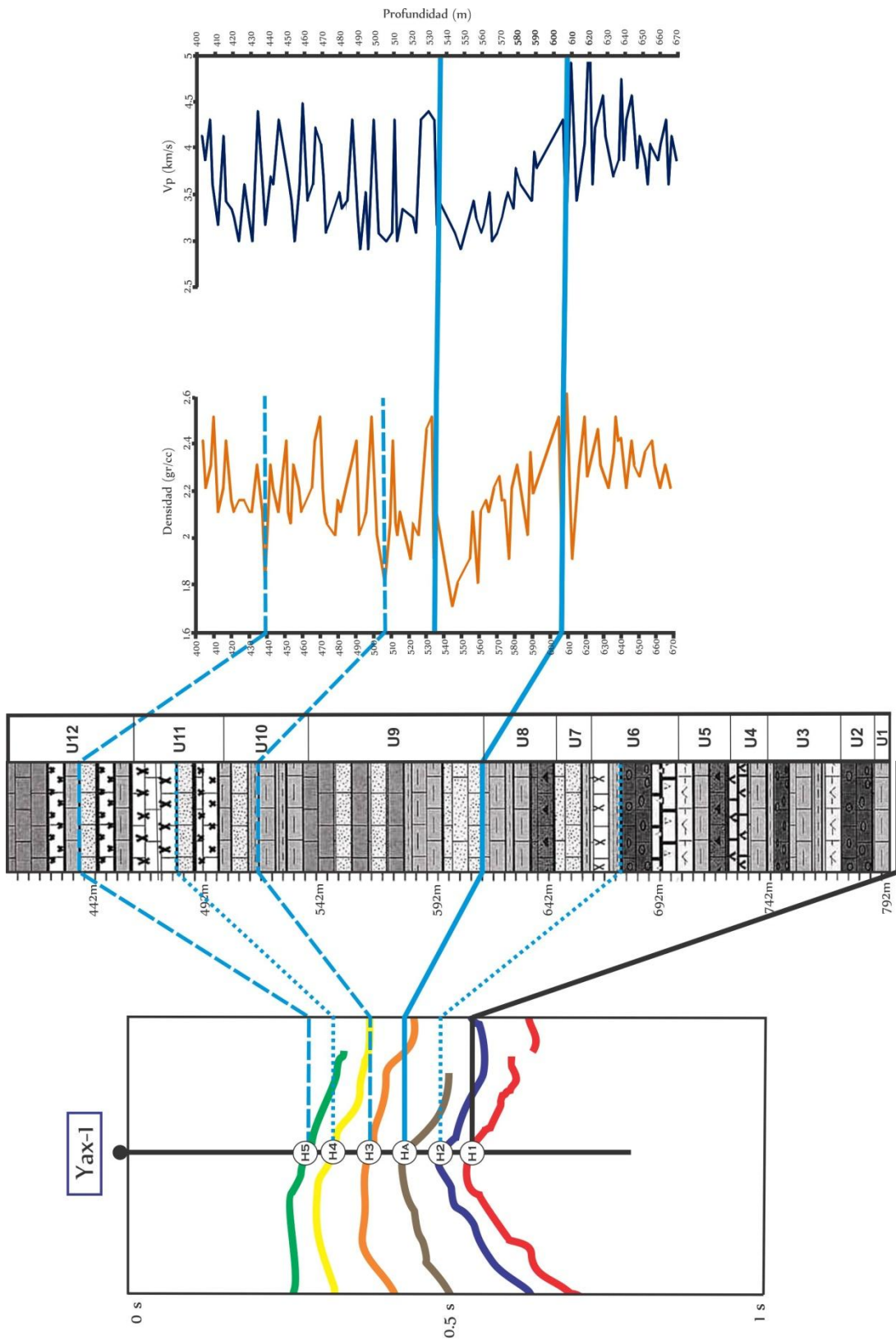


Fig. 7.6 Amarre de la Sección Chicx-A a profundidad

A través del análisis de los núcleos de perforación a las profundidades estimadas de los horizontes, así como a la correlación de los registros de sus propiedades petrofísicas ( $\rho$  y  $V_p$ ), se establecen los contactos litoestratigráficos que marcan un mayor contraste de impedancias acústicas en el medio, reflejados a través de los horizontes sísmicos propuestos.



Fig. 7.7 Fotografía de la caja 16. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H5), aproximadamente a 441 metros.

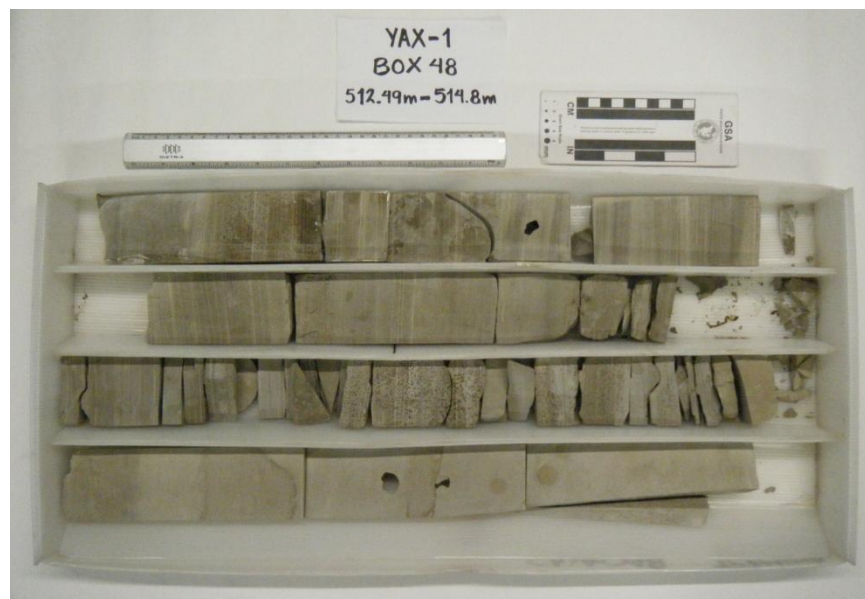


Fig. 7.8 Fotografía de la caja 48. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H3), aproximadamente a 514 metros.



Fig. 7.9 Fotografía de la caja 92. Contacto litoestratigráfico (Horizonte HA), aproximadamente a 609 metros.

Las figuras 7.7, 7.8 y 7.9 muestran los contactos litoestratigráficos para los horizontes H5, H3 y HA, definidos por el amarre a partir de la columna litoestratigráfica y la correlación de los registros. Estos contactos corresponden a un cambio litológico entre calizas, lutitas y calcarenitas (Fig. 4.3).



Fig. 7.10 Fotografía de la caja 32. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H4), aproximadamente a 477 metros.



Fig. 7.11 Fotografía de la caja 125. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H2), aproximadamente a 680 metros.

Debido a que los registros de  $\rho$  y  $V_p$ , se tienen para el intervalo de profundidad de 400 a 670 metros, el amarre del horizonte sísmico H2 queda definido a partir de la columna litoestratigráfica, al igual que el horizonte H4, los cuales se establece que marcan contactos caliza-calcarenita y lutitas-calizas (Fig. 7.10 y 7.11).

La tabla 12 muestra las profundidades definidas por el amarre de la sección sísmica Chicx-A.

Chicx-A	Profundidad (m)				
	1ra A.	2da A.	$\rho/V_p$	C.L.	Amarre
H5	370	425	435	435	<b>441</b>
H4	439	460	470	480	<b>477</b>
H3	521	500	505	512	<b>514</b>
HA	589	610	605	612	<b>609</b>
H2	685	695	-	680	<b>680</b>
H1	795	795	-	795	<b>795</b>

Tabla 12 Profundidades obtenidas para los horizontes sísmicos de la sección Chicx-A, para la primera y segunda aproximación, registros, columna litoestratigráfica y amarre.

## 7.2 Amarre Sección Sísmica Chicx-A1

Para la sección sísmica Chicx-A1, a través del análisis estratigráfico de secuencias se obtienen ocho horizontes sísmicos (Fig. 5.7), de los cuales siete interceptan al pozo Yax-1, al proyectar éste hacia la línea sísmica correspondiente (Fig. 5.8). A partir del amarre inicial a 795 metros (H1), de la correlaciones de los registros de densidad y velocidad de onda P, y de la columna litoestratigráfica de Escobar (2011), se obtiene el amarre para los horizontes HC, H4, H3 y H2 (Fig. 7.16).



Fig. 7.12 Fotografía de la caja 16. Contacto litoestratigráfico (Horizonte HC), aproximadamente a 441 metros.



Fig. 7.13 Fotografía de la caja 61. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H3), aproximadamente a 543 metros.

El amarre del horizonte HC y H3, al igual que para la sección sísmica Chicx-A, queda determinado por la columna litoestratigráfica y el análisis de los núcleos en los intervalos de la profundidad estimada para este horizonte (Fig. 7.14 y 7.15), definiendo contactos entre un calizas-calcarenitas y lutitas-calizas respectivamente, de acuerdo a Escobar (2011).



Fig. 7.14 Fotografía de la caja 32. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H4), aproximadamente a 477 metros.



Fig. 7.15 Fotografía de la caja 125. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H2), aproximadamente a 680 metros.

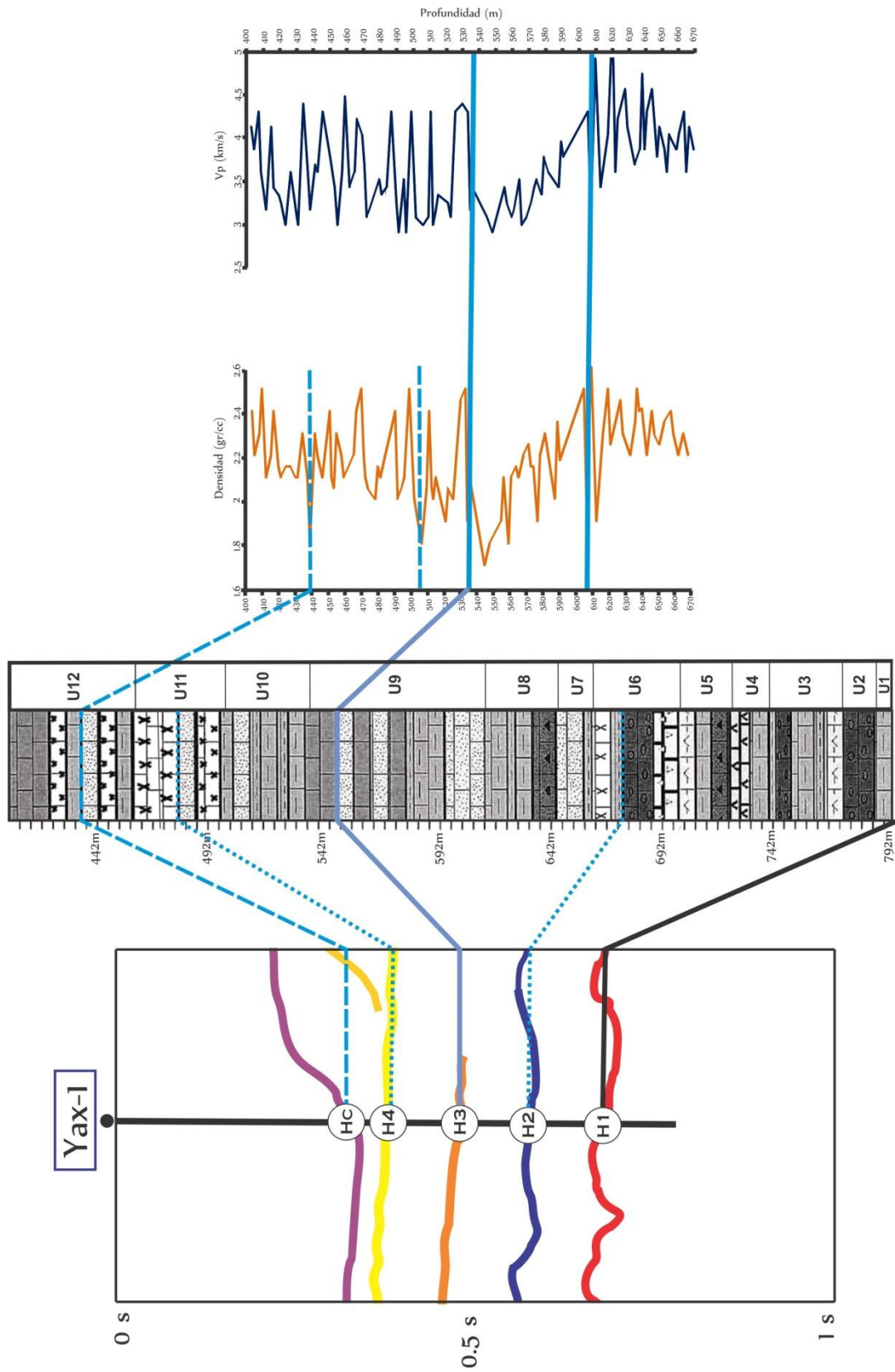


Fig. 7.16 Amarre de la Sección Chicx-A1 a profundidad



La tabla 13 muestra las profundidades definidas por el amarre de la sección sísmica Chicx-A1.

<b>Chicx-A1</b>	<b>Profundidad (m)</b>				
<b>Horizonte</b>	<b>1ra A.</b>	<b>2da A.</b>	<b><math>\rho/Vp</math></b>	<b>C.L.</b>	<b>Amarre</b>
<b>HC</b>	394	420	435	435	<b>441</b>
<b>H4</b>	455	480	470	480	<b>477</b>
<b>H3</b>	533	555	535	550	<b>543</b>
<b>H2</b>	672	680	-	680	<b>680</b>
<b>H1</b>	795	795	-	795	<b>795</b>

Tabla 13 Profundidades obtenidas para los horizontes sísmicos de la sección Chicx-A1, para la primera y segunda aproximación, registros, columna litoestratigráfica y amarre.

### 7.3 Amarre Sección Sísmica Chicx-B

Por medio del análisis estratigráfico de secuencias de la sección sísmica Chicx-B, se obtienen ocho horizontes sísmicos (Fig. 5.10), de los cuales siete interceptan al pozo Yax-1 al realizar su proyección hacia la línea sísmica correspondiente (Fig. 5.11). A partir del amarre inicial a 795 metros (H1), de la correlaciones de los registros de densidad y velocidad de onda P, y de la columna litoestratigráfica de Escobar (2011), se obtiene el amarre para los horizontes H4, H3, H2 (Fig. 7.17).

A través del análisis de los núcleos de perforación a las profundidades estimadas de los horizontes, así como a la correlación de los registros de sus propiedades petrofísicas ( $\rho$  y  $Vp$ ), se establecen los contactos litoestratigráficos para el horizonte H3, mientras que para el horizonte H4 y H2, el amarre queda definido por la columna litoestratigráfica.

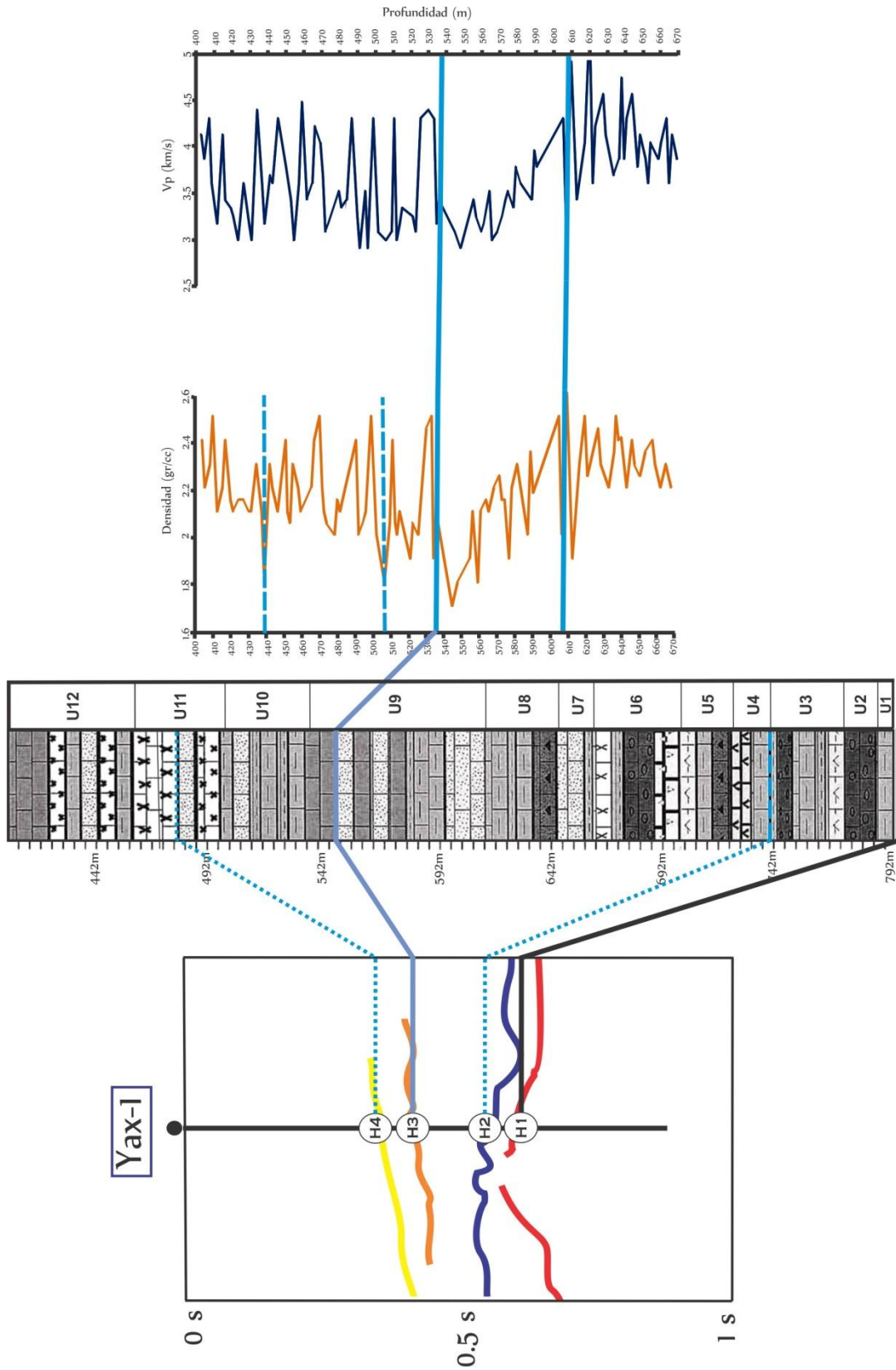


Fig. 7.17 Amarre de la Sección Chicx-B a profundidad



Fig. 7.18 Fotografía de la caja 32. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H4), aproximadamente a 477 metros.



Fig. 7.19 Fotografía de la caja 61. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H3), aproximadamente a 543 metros.

Las figuras 7.18 y 7.20 muestran las cajas de núcleos de perforación que contienen los contactos litoestratigráficos correspondientes a los horizontes H4 y H2, cuyo amarre es definido por la columna y que de acuerdo a Escobar (2011), correspondientes a contactos caliza-calcarenita y caliza-lutita, respectivamente y que corresponden a las unidades 9 y 11. Por otro lado, la figura 7.19 muestra el contacto litoestratigráfico para el horizonte H3, cuyo amarre es definido por la correlación de registros y que corresponde a un contacto caliza-calcarenita (unidad 4).

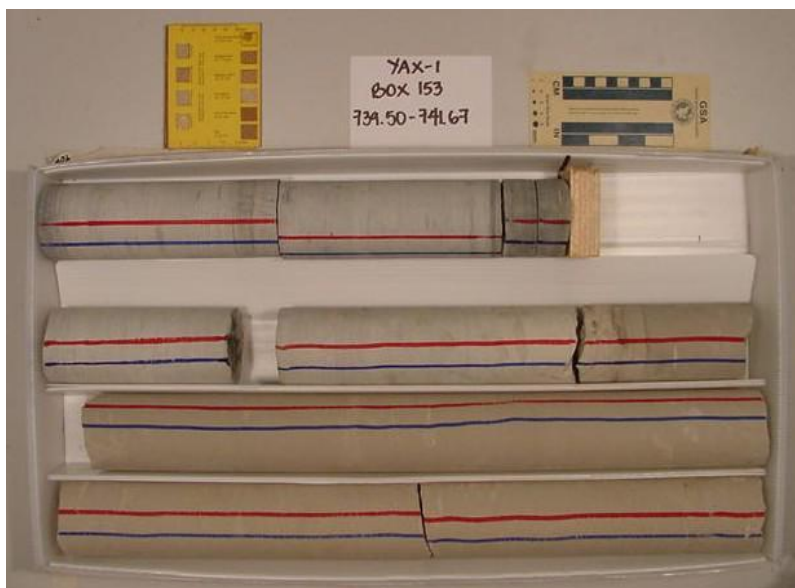


Fig. 7.20 Fotografía de la caja 153. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H2), aproximadamente a 741 metros.

La tabla 14 muestra las profundidades definidas por el amarre de la sección sísmica Chicx-B.

Chicx-B	Profundidad (m)				
	1ra A.	2da A.	$\rho/Vp$	C.L.	Amarre
H4	460	480	470	480	<b>477</b>
H3	544	550	535	550	<b>543</b>
H2	753	755	-	740	<b>741</b>
H1	795	795	-	795	<b>795</b>

Tabla 14 Profundidades obtenidas para los horizontes sísmicos de la sección Chicx-B, para la primera y segunda aproximación, registros, columna litoestratigráfica y amarre.

#### 7.4 Amarre Sección Sísmica Chicx-C

Para la sección sísmica Chicx-C, a través del análisis estratigráfico de secuencias se obtienen seis horizontes sísmicos (Fig. 5.13), los cuales siete interceptan al pozo Yax-1 al realizar su proyección hacia la línea sísmica correspondiente (Fig. 5.14).

De igual forma, a partir del amarre inicial a 795 metros (H6), de la correlaciones de los registros de densidad y velocidad de onda P, y de la columna litoestratigráfica de Escobar (2011), se obtiene el amarre para los horizontes H4, H3 y H2 (Fig. 7.24).



Fig. 7.21 Fotografía de la caja 48. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H4), aproximadamente a 514 metros.



Fig. 7.22 Fotografía de la caja 92. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H3), aproximadamente a 609 metros.



Fig. 7.23 Fotografía de la caja 125. Contacto litoestratigráfico (Horizonte H2), aproximadamente a 680 metros.

Las figuras 7.21 y 7.22 muestran las cajas de núcleos de perforación que contienen los contactos litoestratigráficos correspondientes a los horizontes H4 y H3, los cuales corresponden a cambios litológicos de lutita-calizas y calcarenita-caliza.

Por su parte, en la figura 7.23 se observa el contacto litoestratigráfico para el horizonte H2, cuyo amarre es definido por la columna y que de acuerdo a Escobar (2011), corresponde a un contacto entre lutitas y calizas conglomeráticas.

La tabla 15 muestra las profundidades definidas por el amarre de la sección sísmica Chicx-C.

Chicx-C	Profundidad (m)				
	1ra A.	2da A.	$\rho/Vp$	C.L.	Amarre
H4	491	495	505	512	<b>514</b>
H3	633	625	605	612	<b>609</b>
H2	692	680	-	680	<b>680</b>
H1	795	795	-	795	<b>795</b>

Tabla 15 Profundidades obtenidas para los horizontes sísmicos de la sección Chicx-C, para la primera y segunda aproximación, registros, columna litoestratigráfica y amarre.

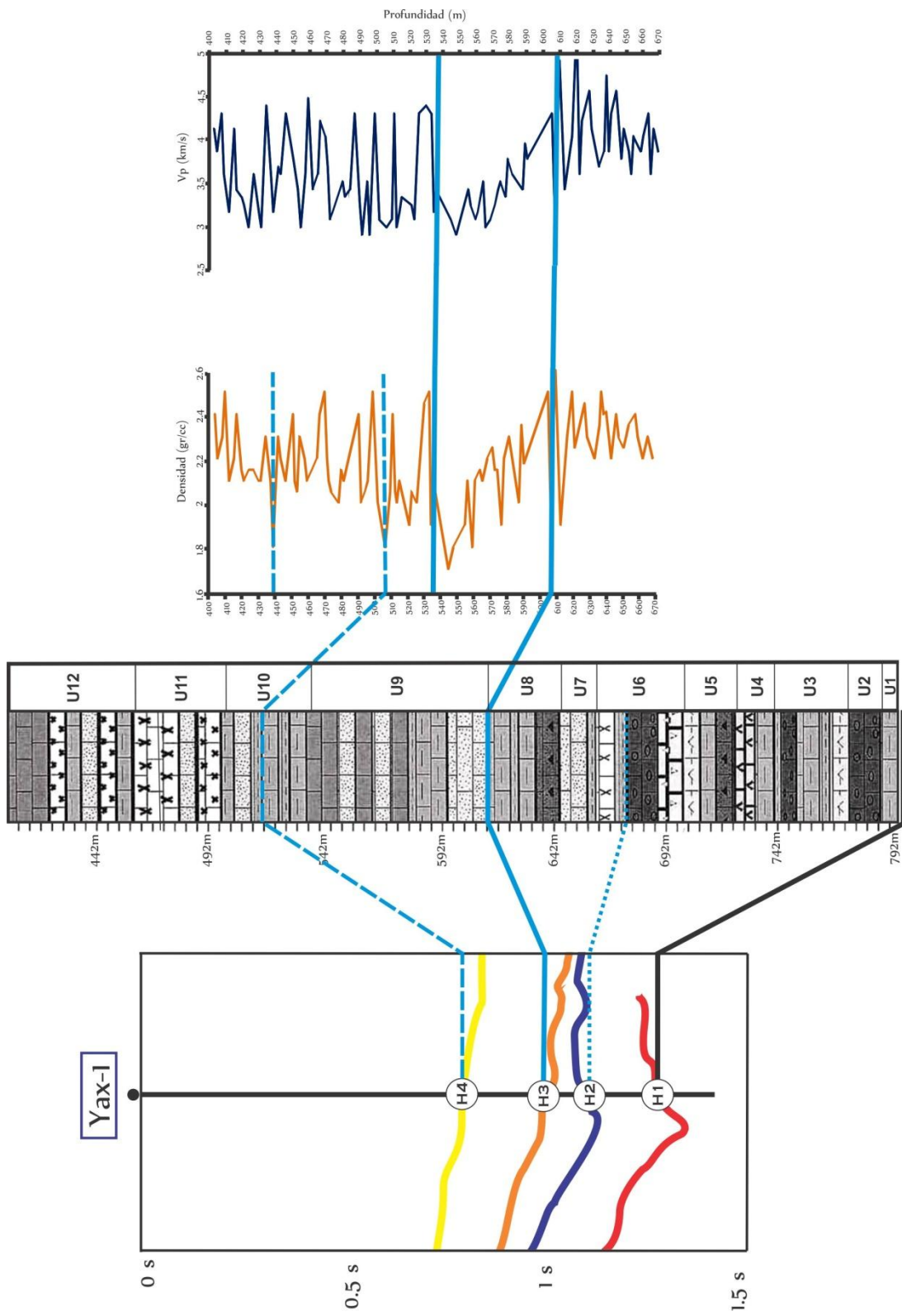


Fig. 7.24 Amarre de la Sección Chicx-C a profundidad

## Morfología del Cráter y Asimetría

De acuerdo a los horizontes sísmicos que fue posible amarrar a través de la estimación de profundidades, los registros de  $\rho$  y  $V_p$ , y la columna litoestratigráfica, es posible hacer algunas interpretaciones sobre la geometría del cráter y su asimetría.

En las secciones sísmicas en cuestión (Chicx-A, A1, B y C), se identifican cuatro reflectores sísmicos que tienen continuidad desde la cuenca central, hasta la depresión anular, (occidental y oriental), por lo que al marcar dichos reflectores, se obtienen cuatro horizontes sísmicos (H1, H2, H3 y H4), que están presentes en las cuatro secciones. Estos horizontes delimitan tres unidades litoestratigráficas, que a su vez son identificables en las cuatro secciones y que son correlacionables con la columna y unidades litoestratigráficas de Escobar (2011).

El primer horizonte, marcado en color rojo y denotado como H1, es el correspondiente al contacto entre brechas de impacto y carbonatos, cuya topografía abrupta se identifica en las secciones y que se sitúa en el pozo Yax-1 a 795 metros en profundidad, por lo cual funge como amarre inicial, para los amarres de los horizontes superiores. Para el segundo horizonte, marcado en color azul y denotado como H2, se estima una profundidad de amarre de 680 metros, la cual para la sección Chicx-B aumenta a 741 metros, por lo que este reflector profundiza en la dirección NW.

El tercer horizonte, en color naranja y denotado como H3, tiene una profundidad de amarre mayor para la sección Chicx-C, de 609 metros. Para el cuarto horizonte, denotado H4 y marcado en color amarillo, la sección Chicx-C también presenta la estimación de profundidad de amarre mayor, respecto a las demás secciones, por lo que tomando en cuenta sólo las profundidades estimadas, el sector NW, es el más profundo del cráter.

De acuerdo al doble tiempo de viaje del horizonte H1, tomado directamente de cada sección migrada en tiempo, se observa que los horizontes de las secciones Chicx-A1 y C, presentan los mayores tiempos (Tablas 6 y 4), ambos por arriba del segundo en doble tiempo de viaje, lo cual implica que la región oriental del cráter es más profunda que la occidental y con ello una evidencia de la asimetría del cráter.



A través del análisis estratigráfico de las secciones Chicx-A y A1 y su amarre a profundidad, es posible hacer interpretaciones acerca de la geometría del cráter y de su asimetría, debido a que ambas forman un solo perfil que corta transversalmente al cráter Chicxulub, y a través del cual se observa el peak ring, la depresión anular oriental y la cuenca central (Fig. 5.4, 5.7 y 7.25).

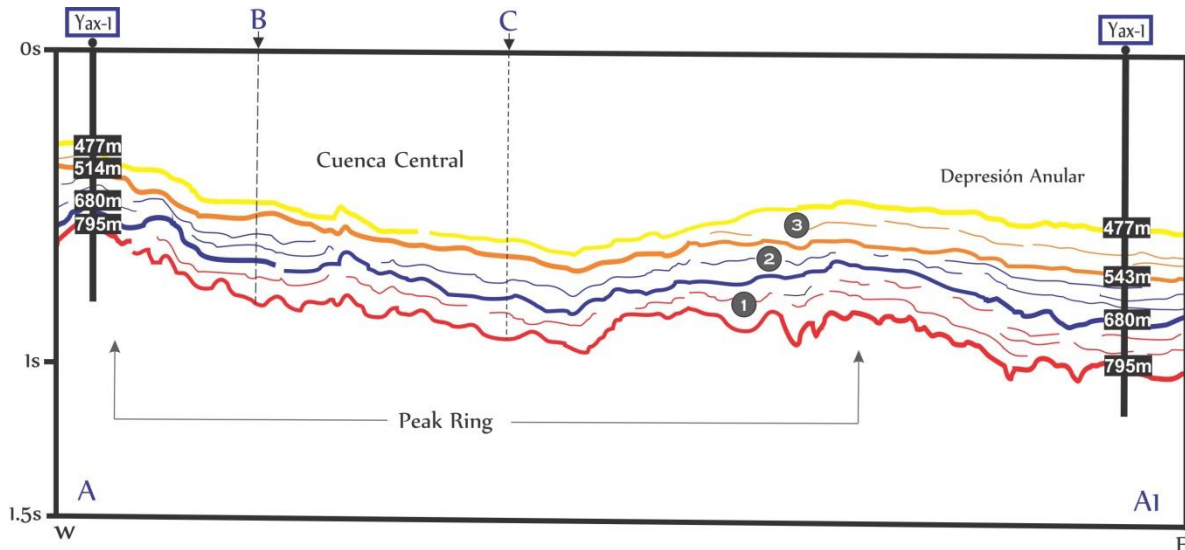


Fig. 7.25 Secciones Chicx-A y A1 formando un solo perfil (A-A1), con la proyección del pozo Yax-1 en ambas y su amarre respectivo. Se muestra la localización de la cuenca central, peak ring y depresión anular oriental, los cuales conforman la estructura del cráter. Se presentan las intersecciones de las líneas sísmicas Chicx-B y C con el perfil A-A1 y las unidades delimitadas tras el análisis de secuencias.

En la Fig. 7.25 se observa el perfil A-A1, en el cual se identifica la geometría y estructura del cráter Chicxulub; en el extremo oeste (A), los horizontes H1, H2, H3 y H4 se ubican aproximadamente por arriba de 0.5 segundos en doble tiempo de viaje, y cuya buzamiento refleja la estructura de peak ring. Las líneas Chicx-B y C interceptan al perfil A-A1 cada una aproximadamente a 20 km del centro del cráter, por lo que se posicionan en la cuenca central.

Hacia el centro del cráter, los horizontes profundizan, ubicándose por arriba del segundo en doble tiempo de viaje, delimitando la cuenca central, y hacia el este (A1), el peak ring y depresión anular oriental. Así pues, los tiempos de viaje de los reflectores sísmicos en cuestión, aumentan de

oeste a este, por lo que tras hacer la conversión a profundidad, se encuentran a una mayor profundidad en la región oriental del cráter.

A través del amarre del horizonte H3, el cual para la sección A tiene una profundidad de 514 metros, y para la sección Chicx-A1, de 543 metros, se observa también que los reflectores sísmicos profundizan hacia el este. Por otro lado, en el amarre de las secciones Chicx-B y C (Fig. 7.16 y 7.23), los horizontes H3 y H4, muestran profundidades mayores para la sección Chicx-C, indicador de que el sector NE, es el más profundo del cráter; lo que muestra a el cráter Chicxulub como una estructura asimétrica.

## 8. CONCLUSIONES

---

La proyección del pozo Yax-1 hacia las líneas sísmicas marinas involucra proyectar datos estratigráficos, especialmente en la región este del cráter (líneas A1 y C). Entre las incertidumbres se tienen las variaciones estratigráficas en diferentes direcciones y posibles asimetrías en la geometría de la cuenca y distribución de las unidades. Para la correlación se selecciona al sector oeste, ya que los datos gravimétricos y magnetométricos marinos y terrestres, son mayormente comparables en este sector. Los horizontes sísmicos de las cuatro secciones se analizan para correlacionarlos a la información estratigráfica y litológica de los pozos, con la finalidad de realizar una mejor interpretación de las secciones, siendo el pozo Yax-1, la referencia para la columna estratigráfica dentro de la cuenca de impacto.

A través del análisis estratigráfico de las secciones sísmicas A, A1, B y C, en la región marina del cráter Chicxulub, se identifican en la secuencia carbonatada, los reflectores sísmicos de mayor energía y continuidad lateral, los cuales separan a la secuencia en varios paquetes, que marcan cambios en el ambiente de depósito y en el nivel del mar dentro de la cuenca central.

Es posible determinar la posición y continuidad del reflector sísmico que marca el límite entre el Paleógeno y el Cretácico (H1), el cual se establece a 795 metros de profundidad en el pozo Yax-1 y que representa un primer amarre para las secciones, definiéndose así las profundidades de los reflectores superiores. Además permite ubicar la base del cráter y definir su geometría, para el depósito de los sedimentos del Paleógeno.

El horizonte H4 representa una discordancia, que puede ser marcada a través de la cuenca; sobre ésta sobreyacen las secuencias progradantes (unidades A, B, C y D), cuyas relaciones estratigráficas indican una regresión marina, con una sedimentación cada vez más pasiva.; lo cual infiere un cambio en el ambiente de depósito.

La cuenca de impacto fue rellenada gradualmente: a través de la estratigrafía de las secuencias y el amarre de las secciones, se observa que la región oriental del cráter y en especial el sector NE, es la más profunda, siendo por consiguiente, la región occidental la que se rellenó primero. La parte oriental y central de la cuenca se rellenaron al último. Estas observaciones sugieren que el cráter Chicxulub es una estructura asimétrica.

El análisis de los núcleos de perforación a través de los registros de sus propiedades petrofísicas, representa una herramienta práctica para definir el amarre de las secciones, ya que es posible observar variaciones en los registros que nos indiquen cambios litológicos en el medio, lo cual es definido por la columna litoestratigráfica.

Las profundidades de amarre de las secciones sísmicas, indican la ubicación de los contactos litoestratigráficos en la sección del Paleógeno, en el pozo Yax-1, cuyos cambios litológicos se presentan entre calcarenitas-calizas y lutitas-calizas.

A través del amarre de las secciones sísmicas, se obtienen las profundidades de los horizontes sísmicos que representan cambios litológicos dentro de la secuencia carbonatada del Paleógeno, a partir de lo cual, es posible analizar factores globales y regionales relacionados con el desarrollo de las secuencias, como cambios en el nivel del mar, ambientes de depósito, entre otros, además del análisis de la estructura y asimetría del cráter Chicxulub.

## BIBLIOGRAFÍA

---

Bell, C., Morgan, J., et al., 2004, Stratigraphic and sedimentological observations from seismic data across the Chicxulub impact basin, *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 39, N. 7, pp. 1-10.

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 pp.

Cross, T., Lessenger, M., 1988, Seismic Stratigraphy, *Earth Planet Sci.*, No. 16, pp. 319-354.

Gulick, S., Barton, P., et al., 2008, Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater, *Nature Geoscience*, Vol. 1, pp. 131-135.

Hildebrand, A.R., Penfield, G.T, et al., 1991, Chicxulub crater: A possible Cretaceous/ Terciary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico, *Geology*, Vol. 19, pp. 867-871.

Kleyn, A., 1983, Seismic reflection interpretation, London: Elsevier applied science.

Kring, D., Hörz, F., et al., 2004, Impact lithologies and their emplacement in the Chicxulub impact crater: Initial results from the Chicxulub Scientific Drilling Project, Yaxcopoil, Mexico, *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 39, No. 6, pp. 879–897.

Morgan, J., Warner, M., 1999, Morphology of the Chicxulub impact crater: Peak ring crater or multi-ring crater, *Geological Society of America Special Papers*, No. 339, pp. 281-290.

Morgan, J., Warner, M., 2000, Peak ring formation in large impact craters, geophysical constraints from Chicxulub, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 183, pp. 346-354.

Orozco, M., et al., 2011, Fuzzy logic and image processing techniques for the interpretation of seismic data, *J. Geophys. Eng.* Vol. 8, pp. 185-194.

Salguero, E., et al., 2010, Fracturing and deformation in the Chicxulub crater – Complex trace analysis of instantaneous seismic attributes, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 27, No. 1, pp. 175-184.

Sharpton, V.L., Dalrymple, G.B., et al., 1992, New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary, *Nature*, Vol. 359, pp. 819-821.

Sheriff, R., 1995, *Exploration Seismology*, Cambridge University, UK.

Sheriff, R., 1980, *Seismic Stratigraphy*, Cambridge University, UK.

Snyder, D., Hobbs, W., 1999, Ringed structural zones with deep roots formed by the Chicxulub impact, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. 5, pp. 743-755.

Stinnesbeck, W., Keller, G. et al., 2004, Yaxcopoil-1 and the Chicxulub impact, *Int. J. Earth Sci.*, No. 93, pp. 1042–1065.

Stöffler, D., Artemieva, N., 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, No. 7, pp. 1035–1067.

Rebolledo, M., Urrutia, J., et al., 2000, UNAM Scientific Shallow-Drilling Program of the Chicxulub Impact Crater, *International Geology Review*.

Tuchscherer, M., Reimold, W., et al., 2004, Major and trace element characteristics of impactites from the Yaxcopoil-1 borehole, Chicxulub structure, Mexico, *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 39, No. 6, pp. 955–978.

Urrutia, J., Camargo, A., Pérez, G., 2011, Discovery and Focused Study of the Chicxulub Impact Crater, EOS, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 92, No. 25, pp. 209-216.

Urrutia, J., Chávez, J., et al., 2008, Impact ejecta and carbonate sequence in the eastern sector of the Chicxulub crater, Geoscience No. 340, p. 801-810.

Urrutia, J., Morgan, J., et al, 2004, The Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP), Meteoritics & Planetary Science, Vol. 39, No.6, pp. 787–790.

Urrutia, J., Perez, L., et al., 2010, The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico, Geofísica Internacional, No. 50, pp. 99-127.

Vermeesch, P., Morgan, J., 2004, Chicxulub central crater structure: Initial results from physical property measurements and combined velocity and gravity modeling, Meteoritics & Planetary Science, Vol. 39, No. 7, pp. 1019–1034.

Vermeesch, P., Morgan, J., et al., 2009, Three dimensional joint inversion of travelttime and gravity data across the Chicxulub impact crater, Journal of Geophysical Research, Vol. 114, pp. 1-19.

Wohlgemuth, L., Bintakies, E., et al., 2004, Integrated deep drilling, coring, downhole logging, and data management in the Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP), Mexico, Meteoritics & Planetary Science, Vol. 39, No. 6, pp. 791–797.

Yilmaz, O., 2001, Seismic Data Processing, Society of Exploration Geophysicists, USA.