



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE PERFILES SÍSMICOS EN LA  
PLATAFORMA CARBONATADA DE YUCATAN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

**NANCY AVENDAÑO FABILA**



DIRECTOR: Dr. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI

MÉXICO D.F., CD. UNIVERSITARIA

2012

## INDICE

RESUMEN .....	1
CAPITULO 1. INTRODUCCION .....	3
CAPITULO 2. PLATAFORMA CARBONATADA DE YUCATAN.....	4
2.1 Área de Estudio: La Plataforma Carbonatada de Yucatán y su Geología Regional.....	4
2.2 El Cráter Chicxulub .....	6
2.3 Estudios Previos .....	7
2.3.1 Estudios Gravimétricos y Magnetométricos .....	8
2.3.2 Estudios Sísmicos de Reflexión.....	9
2.3.3 Pozo Yaxcopoil-1 .....	10
2.3.3.1 Columna Litológica (1511m-775m) .....	11
CAPITULO 3. FUNDAMENTOS TEORICOS.....	22
3.1. Método Sísmico de Reflexión .....	22
3.2. Leyes fundamentales.....	23
3.2.1 Ley de Snell .....	23
3.2.2 Principio de Huygens .....	23
3.3. Ondas .....	23
3.3.1 Ondas Sísmicas como señal analítica .....	24
3.3.2 Impedancia Acústica.....	25
3.3.3 Coeficiente de Reflexión .....	25
3.3.4 Ondícula.....	26
3.3.5 Ondícula de Ricker .....	27
3.3.6 Sismograma Sintético .....	27
3.4 Resolución Sísmica Vertical.....	29
3.5 Inversión Sísmica.....	30
3.6 Determinación de Velocidades .....	30
3.6.1 Determinación Directa de Velocidades en Pozo Profundo.....	32
3.6.2 Registro Sónico.....	32
3.7 Atributos Sísmicos .....	35
3.7.1 Análisis de Traza Compleja y los Atributos Instantáneos de Amplitud, Fase y Frecuencia .....	36
3.7.2 Atributo instantaneo de envolvente de amplitud .....	39

3.7.2 Factor de calidad Q instantaneo .....	40
3.7.4 Atributo instantaneo de fase .....	40
3.7.5 Atributo instantaneo de frecuencia.....	41
CAPITULO 4. METODOS.....	43
4.1 Adquisición.....	43
4.1.1 Experimento Sísmico Chicxulub .....	44
4.2 Procesamiento.....	46
4.3 Generación de Sismogramas Sintético .....	49
4.4 Utilizando Petrel. Atributos Sísmicos .....	53
CAPITULO 5. INTERPRETACION Y DISCUSION DE RESULTADOS .....	54
5.1 Correlación del Sismograma Sintético .....	54
5.1 Empalme de Sismograma Sintético con Sección Sísmica A.....	55
5.2 Interpretación con Atributos Sísmicos.....	57
5.2.1 LINEA CHICX C.....	57
5.2.2 LINEA CHICX A.....	74
5.2.3 LINEA CHICX R4.....	82
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	87
6.1Conclusiones.....	87
6.2 Recomendacione.....	89
BIBLIOGRAFIA.....	90

## Dedicatorias

A mi papá y mamá, José Luis y Ángeles.

Porque a través de ellos, veo mi origen, puedo amar con completa libertad y sortear la adversidad con mi espíritu, por el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mi hermano, José Luis.

El guerrero que me cargo y jugo conmigo cuando era niña, ahora sostiene la tutela de una doncella y un apuesto príncipe. Gracias por todo tu amor, apoyo y comprensión en esta vida.

A mis tíos, Adrián y Amadín.

Por el apoyo incondicional que siempre me han brindado, por el amor que me han mostrado, por permitirme compartir uno mas de mis triunfos, a sus dos hijos, Jorge y Marco, quienes han sido para mi unos amigos entrañables.

A mis amigos.

Por formar parte de este camino de superación y preparación profesional, por todas las experiencias compartidas, por todo el apoyo incondicional que siempre me brindaron, por la sincera amistad que siempre me han mostrado, Carlos Valdez, Iván, Viri, Sandra, Melisa, Nidia, Gaby, Tania, Mara, Jacob, Gualberto, Luis A., Luis, Diego y a todos aquellos que de alguna manera han sido parte de este camino.

A mi Dios por guiarme en este camino y ser el sendero que lo alumbraba.

## Agradecimientos

A mi Director de tesis, Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi.

Por su apoyo en la realización de este trabajo, por su tiempo y dedicación en cada momento que se lo pedía, por compartir conmigo sus conocimientos. Gracias.

A mis profesores.

Agradezco su confianza, motivación y dedicación en mi formación profesional. Todos sus consejos, tutoría y apoyo incondicional. Gracias.

A mi jurado de examen.

Dr. Joaquin Aguayo Camargo.

Dr. Gullermo Pérez Cruz

M.C. David Escobedo Zenil

Dr. Carlos Ortiz Alemán

Por su disposición y contribución en la corrección y argumentación de esta obra. A todos ustedes, gracias.

A mí querida Universidad Nacional Autónoma de México.

Por enriquecer y fortalecer mi persona a través de la educación, por prepararme y darme las armas para mi futuro, por que siempre estaré orgullosa de ser Universitaria.

Al proyecto de DGAPA PAPIIT IN101112  
por la beca que se me fue otorgada durante mi participación en dicho proyecto.

## RESUMEN

En este trabajo se interpretan imágenes sísmicas adquiridas en la plataforma carbonatada de Yucatán, mediante el análisis de atributos sísmicos. Los perfiles sísmicos seleccionados para el estudio son: Línea Chicx A, Línea Chicx C y Línea Chicx R4, y cubren diferentes zonas de la estructura del cráter y de la plataforma carbonatada. Estos perfiles se adquirieron como parte del Experimento Sísmico Marino Chicxulub en la zona al norte de la península. Para la interpretación se consideraron los atributos de Envolvente de Amplitud, Frecuencia Instantánea y Fase Instantánea.

Como parte del análisis se utilizaron datos del pozo exploratorio Yaxcopoil-1, perforado dentro del programa de investigaciones del cráter Chicxulub. El pozo está localizado 40km al sur de Mérida, sus coordenadas, longitud 89.72W, 20.74 N, fuera de la zona de perfiles sísmicos. Para la correlación con los datos sísmicos se asumieron relaciones de simetría radial dentro de la estructura del cráter y los datos del pozo se proyectaron sobre las líneas sísmicas Chicx A y Chicx C. El pozo Yaxcopoil-1 se núcleo en forma continua entre los 400 y los 1511 m, lo que proporciona muestras de las secuencias carbonatadas del Cretácico y del Paleógeno y de la secuencia de brechas de impacto. Datos de parámetros petrofísicos se determinaron de mediciones obtenidas en laboratorio de los núcleos. Con los datos de velocidades sísmicas y densidades se estimaron los contrastes de impedancia y se generó un sismograma sintético.

Este trabajo práctico es de interés, ya que en la industria petrolera lo que se desea es generar imágenes sísmicas de alta resolución, para poder definir con mayor precisión las propiedades petrofísicas y estructuras del subsuelo. Los atributos sísmicos son una herramienta para la interpretación de imágenes sísmicas, ya que estos resaltan características de las imágenes sísmicas, que no son visibles con el procesado estándar.

En el análisis se realizó una correlación de la sección sísmica con el sismograma sintético el cual resultado exitoso, ya que los picos que nosotros ubicamos en el sismograma marcándonos posibles cambios de litología amarran bien con los reflectores en la imagen sísmica Chicx A y los respectivos cambios litológicos observados en la columna, este procedimiento también se hizo con la imagen

sísmica Chicx A. Al comparar las dos correlaciones que se hicieron del sismograma sintético con ambas secciones sísmicas, Chicx A y Chicx C, es aceptable, tomando en cuenta que las dos secciones tocan parte del cráter de impacto en la dirección SW, se ubico el sismograma a la misma distancia del cráter a la misma profundidad en ambas secciones.

## CAPITULO 1. INTRODUCCION

En la industria petrolera una de las herramientas más usadas son las secciones sísmicas, generadas después del procesamiento de datos sísmicos adquiridos en el área de estudio. La optimización de estas imágenes del subsuelo es de suma importancia para poder hacer una mejor caracterización y contar con información de alta resolución para la toma de decisiones.

El contraste de impedancias en el subsuelo no es determinante para tener reflectores bien definidos que nos ayuden a identificar cambios de litologías, ya que estos dependen de varias propiedades del subsuelo, anisotropía, contraste de impedancias, cambios graduales de litología, por mencionar algunos.

El presente trabajo tiene por objetivo interpretar las imágenes sísmicas adquiridas en la plataforma carbonatada de Yucatán mediante el análisis de los atributos sísmicos físicos, así como generar un sismograma sintético con las mediciones obtenidas en laboratorio de los núcleos provenientes de perforaciones y su correlación con la columna lito-estratigráfica correspondiente.

Este trabajo práctico, es de suma importancia, ya que en la industria petrolera, lo que se desea es tener imágenes sísmicas de alta resolución, para poder definir con mayor precisión las propiedades y estructuras del subsuelo. Los datos analizados en el presente trabajo provienen de los experimentos sísmicos marinos del programa de investigaciones del cráter Chicxulub y del proyecto de perforaciones científicas Chicxulub. Para este estudio se seleccionaron varias líneas sísmicas en la plataforma de Yucatán en la zona al norte de Puerto Progreso. Los núcleos fueron tomados en el pozo Yaxcopoil-1, este pozo fue perforado por la UNAM y el Programa Internacional de Perforaciones en Continentes en el año 2001-2002.

El pozo Yaxcopoil-1 se localiza a 40km al sur de la ciudad de Mérida, en la península de Yucatán, sus coordenadas, longitud 89.72 W, 20.74 N. Los datos con los cuales generare el sismograma, fueron obtenidos en el laboratorio al hacer las mediciones necesarias de densidad y velocidad de onda P a los núcleos que se obtuvieron de la perforación de dicho pozo.

## CAPITULO 2. PLATAFORMA CARBONATADA DE YUCATAN.

### 2.1 Área de Estudio: La Plataforma Carbonatada de Yucatán y su Geología Regional

La península de Yucatán corresponde a la parte que emerge de la plataforma continental de Yucatán, tiene una extensión de 500 000 km<sup>2</sup> y que separa al mar Caribe del Golfo de México, el 90% de su territorio se encuentra a menos de 200 msnm, la única elevación prominente es la Sierra de Tícul. Esta península topográficamente se puede dividir en planicie norte, Sierra de Tícul y planicie sur.

El Bloque Yucatán es un bloque tectónico único del Paleozoico, sin plegamientos, cuyo límite es la falla Motagua. Este basamento metamórfico de origen pangénico continental se separa del Bloque Louisiana-Texas al momento de la apertura del Golfo de México; su posición actual viene desde finales del Triásico (~ 200 millones de años).

Esta plataforma contiene en el subsuelo la huella del impacto catastrófico del límite Cretácico-Terciario que causó la extinción de ~65-75 % de las especies del planeta, incluyendo completamente al grupo de los dinosaurios.



Fig. 2.1 Vista satelital de la Península de Yucatán

Fisiográficamente la Península de Yucatán se caracteriza por una superficie kárstica con un escenario de erosión dentro de un ciclo geomorfológico, existen cavidades y conductos en las rocas calcáreas variando desde poros y fracturas, hasta grandes cavernas cuya profundidad va de los 12 a los 30 m.

La plataforma de Yucatán, conformada por calizas de periodos del Cretácico (144 a 65 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 subsuelo de la plataforma de Yucatán 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, dentro de las rocas sedimentarias más antiguas que se han encontrado en esta provincia ocurren también ocultas bajo rocas más jóvenes del Cretácico y Cenozoico. Dichas rocas consisten en lechos rojos continentales que descansan directamente sobre el basamento Paleozoico 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 (Formación Chicxulub). Salvo esta interrupción catastrófica, la sedimentación durante el Terciario es análoga a la del Cretácico, es decir, consiste esencialmente en carbonatos y evaporitas. Los carbonatos por lo general están fuertemente dolomitizados. El Cuaternario igualmente está representado por carbonatos aunque carente de evaporitas.

Las formaciones representativas de las secuencias mencionadas que están expuestas en la superficie (bajo la capa de caliche) son las siguientes: Caliche (Eoceno medio temprano y Paleoceno), Pisté 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 asignados nombres formales.

Los límites estructurales de esta península están de la siguiente forma, al oriente limita contra el sistema de fallas Bartlet y las Montañas Maya, así como el Canal de Yucatán, mientras al poniente con el escarpe de Campeche, este último producto del rompimiento tensional asociado con la separación de América del Sur de la región Jurásica del Golfo de México, en la parte sur se encuentran 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 (Ríos Candelaria, Usumacinta y Grijalva).

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 ENE y en el sector oriental de la provincia.

## 📍 2.2 El Cráter Chicxulub

El cráter Chicxulub, parte de un grupo selecto de rasgos geológicos, constituye un laboratorio para investigar los procesos de formación de cráteres y los efectos de impactos en el planeta. Chicxulub es uno de tres cráteres complejos multi-anillos documentados en el registro terrestre y el impacto es relacionado a los cambios ambientales y climáticos que marcan la frontera Cretácico/Paleógeno (K/Pg) y las extinciones masivas de organismos.

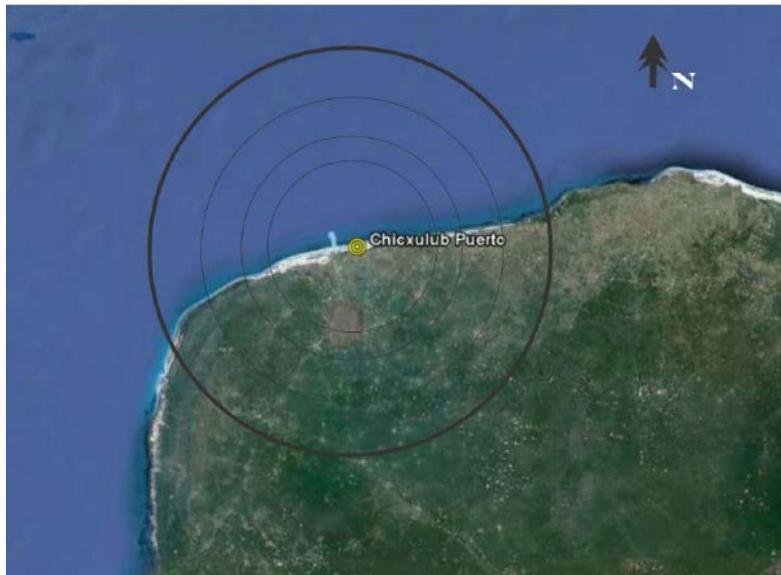


Fig. 2.2 Localización del cráter Chicxulub en la Península de Yucatán. Imagen base modificada de Google Earth, 2012.

El cráter, localizado en la porción noroeste de la península de Yucatán, está cubierto por sedimentos carbonatados y fue identificado inicialmente en los estudios dentro del programa de exploración de Petróleos Mexicanos (Penfield y Camargo, 1981). En la superficie, evidencias del cráter sepultado

incluyen al anillo de cenotes y rasgos topográficos semi-circulares, los cuales se asocian a la compactación diferencial de los materiales fragmentados en el impacto y que forman parte del relleno de la estructura.

El cráter tiene un diámetro aproximado de 200 km, esta una parte en el mar y otra en tierra y puede ser investigado usando métodos geofísicos terrestres, marinos y aéreos, proyectos de perforación y análisis de laboratorio con las muestras obtenidas y modelados realizados por computadora. 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 perforaciones.

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

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

La capa de eyecta con el material fragmentado identificada como la capa K/Pg constituye un marcador estratigráfico a escala global, permitiendo correlaciones estratigráficas y análisis de procesos en la transición del Mesozoico al Cenozoico.

### 2.3 Estudios Previos

Los estudios en el cráter Chicxulub, inicia 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.

Esta delgada capa de arcilla provocó grande interés en los científicos, ya que al realizar estudios, se dieron cuenta que contenía iridio, elemento poco común en rocas terrestres pero abundante en material cósmico, posteriormente 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 se han 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, 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 multi-anillo, indicándose el número de anillos que lo conforman.

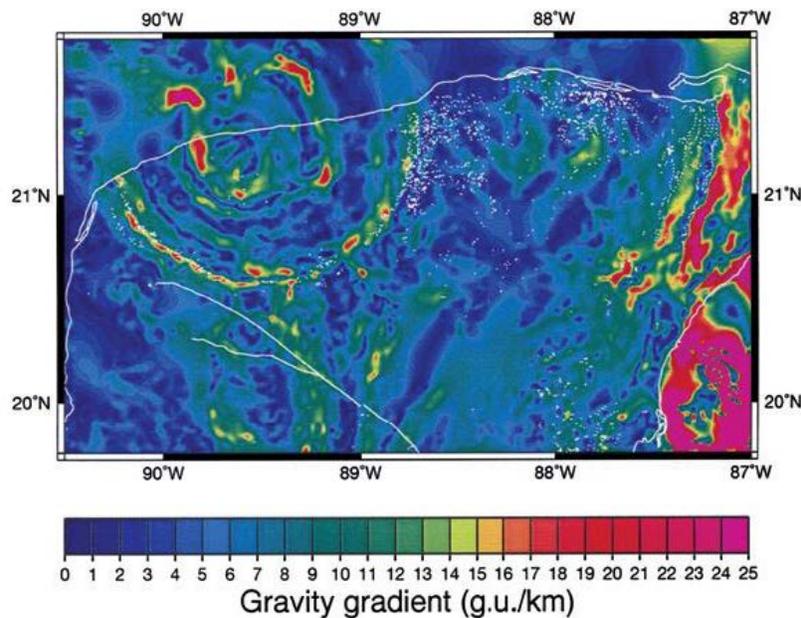


Fig. 2.3 Gradiente horizontal de gravedad calculado a partir de la Anomalía de Bouguer. Imagen tomada de Urrutia, J., et al., 2010, The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico, Geofísica Internacional, No. 50, p. 104.

### 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.

Durante el 2005 se realizó un proyecto entre la Universidad de Texas UTIG, la Universidad de Cambridge, el Imperial College 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 A0, A1, B, C, R1, R3. (Fig. 2.4).

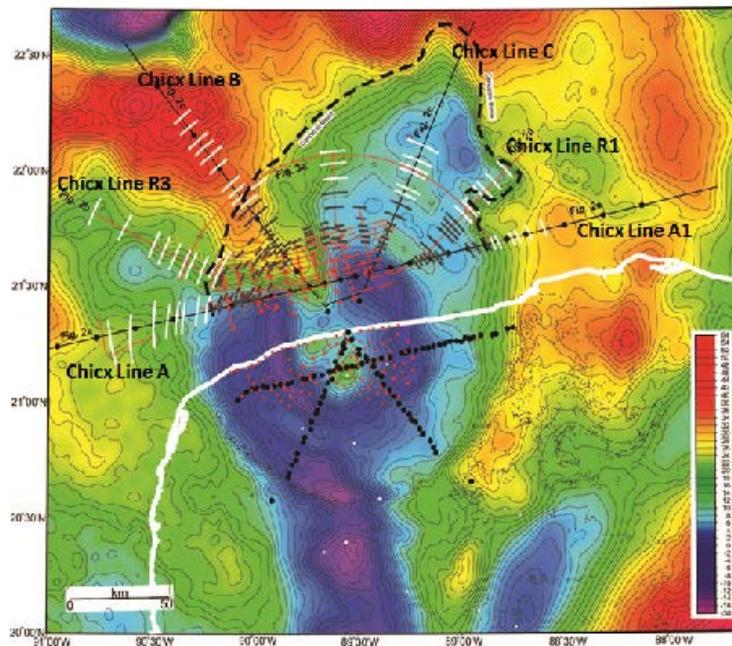


Fig. 2.4 Mapa Gravimétrico de anomalía de Bouguer sobre el Cráter Chicxulub (de Sharpton et al., 1993). Ubicación de los perfiles sísmicos de reflexión (líneas A0, A1, B, C, R1, R3).

### 2.3.3 Pozo Yaxcopoil-1

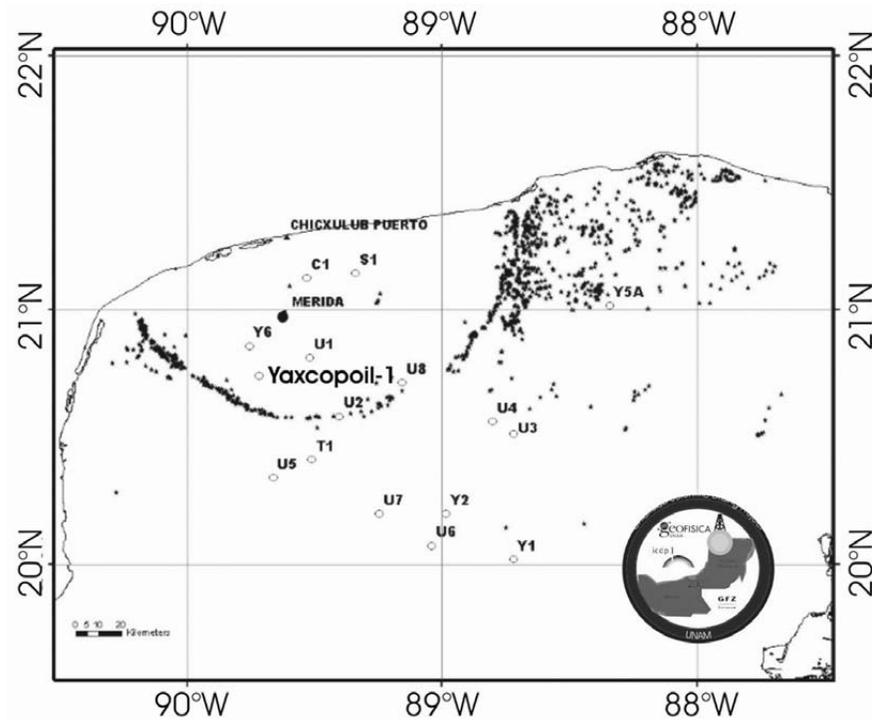


Fig. 2.5 Localización del Pozo Yaxcopoil-1. Imagen tomada de Urrutia, J., et al., 2010, The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico, Geofísica Internacional, No. 50, p. 788.

Uno de los pozos en el Programa de Perforaciones es el Yaxcopoil-1. Dicho pozo fue perforado de diciembre del 2001 a marzo del 2002, en el sector sur del cráter y financiado por la UNAM y el Programa Internacional de Perforación Científica Continental (ICDP por sus siglas en inglés) (Urrutia et al., 2004). El estudio fue realizado con base en la integración de datos gravimétricos, magnéticos, magnetotelúricos y sísmico



Figura. 2.6 Operaciones de perforación y núcleo para el Pozo. Imagen tomada de Urrutia, J., et al., 2010, The Chicxulub multi-ring impact cráter, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico, Geofísica Internacional, No. 50, p. 788.

Varios grupos de investigación y empresas de perforación como Pemex, el centro de Investigación GFZ-Potsdam y DOSECC, auxiliaron con la recolección de muestras (núcleos) en el interior del pozo. Estas fueron obtenidas hasta una profundidad de 1511 metros.

Los núcleos recuperados han sido estudiados por diferentes métodos. Sus mediciones incluyen: porosidad, permeabilidad, velocidades sísmicas, susceptibilidad magnética, contenido de elementos radioactivos, potencial natural y resistividad eléctrica. La recuperación de núcleos se dio desde los 400 m (superior terciario) hasta la profundidad final.

Se realizaron mediciones geofísicas en el fondo del pozo con un equipo de sondas para diámetros reducidos proporcionado por el programa internacional de perforaciones científicas en continentes (ICDP por sus siglas en inglés). Dichas lecturas fueron tomadas en dos campañas una a profundidad de perforación de 400 m antes de ajustar la tubería de revestimiento y la otra a una profundidad total de 1510 m después de la terminación de la perforación.

### 2.3.3.1 Columna Litológica (1511m-775m)

De acuerdo a los núcleos recabados en la perforación del pozo Yax-1 y al análisis de los mismos, se han definido unidades litoestratigráficas a través de los 1100 metros de núcleos recuperados (Urrutia et al., 2004; Kring et al., 2004; Stoeffler et al., 2004). De acuerdo a Stinnesbeck et al. (2004),

columna se divide en 10 unidades (A-K, Fig. 2.6), 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 wackstone, de acuerdo a estudios de lámina delgada, cuenta con abundantes foraminíferos planctónicos, así como presencia de margas. La unidad C, abarca desde 1452 a 1315 metros y consiste predominante de dolomias 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, esta 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 lamina delgada indican calizas de tipo packstone y grainstone.

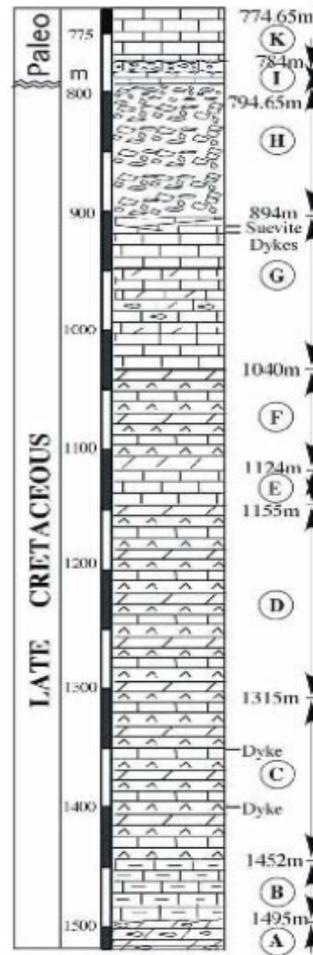


Fig. 2.7. Columna litológica del pozo Yax-1, a partir de 774.6 metros, a 1511 metros.

Columna modificada de Stinnesbeck, Wm, 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 746.6, a 894 metros y está compuesta de 100 metros de brecha de impacto suevítica con contactos erosionados (superior e inferior); los datos de las brechas son angulosos a subangulosos y de pocos centímetros de diámetro. Se trata de una brecha polimictica 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 esta conformada básicamente por calizas dolomíticas; esta unidad sobryace en el contacto erosionado de la unidad H, en el cual se presentan laminas de areniscas calcárea. Entre esta disconformidad y el límite K/T, se encuentra

una capa de 50cm de espesor representada como la unidad la. La unidad la está compuesta por caliza micritica, la cual presenta laminación paralela. La unidad lb consiste de calizas micriticas blancas y grisáceas (wackstones d foraminíferos planctónicos).

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

### **Columna Litoestratigrafica (792m-404m)**

De acuerdo a Escobar (2011), a través del análisis de lamina delgada de los núcleos de perforación, con un intervalo de muestreo de 5 metros, la columna se divide en 12 unidades litoestratigraficas (I-12, Fig. 2.7), desde los 794 metros, hasta los 404metros.

La unidad 1 tiene un espesor de 5 metros, abarcando de los 792 metros 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 lutitica, lutitas, ambas con laminación paralela, caliza limosa, caliza wackstone y caliza conglomerática, esta última con presencia de estilolitas; esta se presenta de los 772 metros a los 737 metros y presenta contacto oblicuo con la unidad 2.

La unidad 4 cuenta con un espesor de 20 metros, esta abarca de los 737 a los 717 metros, se encuentra compuesta por una secuencia de caliza limosa y una secuencia de caliza wackstone, la cual presenta precipitación de sal. La unidad 5 se encuentra 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 lutitica.

Con lo que respecta a la unidad 6 se encuentra entre los 692 a los 65 metros, se conforma por caliza con fragmentos de brecha, caliza conglomerática, lutitas con estratificación cruzada y caliza wackstonesilicificada. 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 abarca de los 637 a los 605 metros, con un espesor aproximado de 32 metros, se conforma por una secuencia de calcarenita con nódulos de chert, la cual presenta laminación

cruzada, calizas limosas y calizas tipo wackstone con bioclastos. La unidad 9 se encuentra de los 605 a los 525 metros, siendo la unidad mayor definida; esta se conforma por una secuencia de calcarenita con laminación paralela, caliza limosa y una intercalación de wackstone con bioclastos y calcarenita, presenta una estratificación cruzada.

La unidad 10 se encuentra de los 525 a los 485 metros, se compone de una secuencia de caliza limosa con laminación paralela, lutitas y calcarenita fracturada. La unidad 11 se encuentra de los 485 a los 445 metros, con un espesor de 40 metros, está conformada por una secuencia de caliza wackstonesilicificada y calcarenita, las cuales presentan estratificación cruzada.

Por último se encuentra la unidad 12, ésta se encuentra de los 445 a los 404 metros; siendo ésta, la unidad superior de la columna litológica; se compone por una secuencia de calcarenita, caliza limosa con fracturamiento y caliza wackstonesilicificada, la cual se extiende aproximadamente hasta los 422 metros; sobreyace sobre esta y hasta la cima de la columna caliza wackstone con bioclastos.

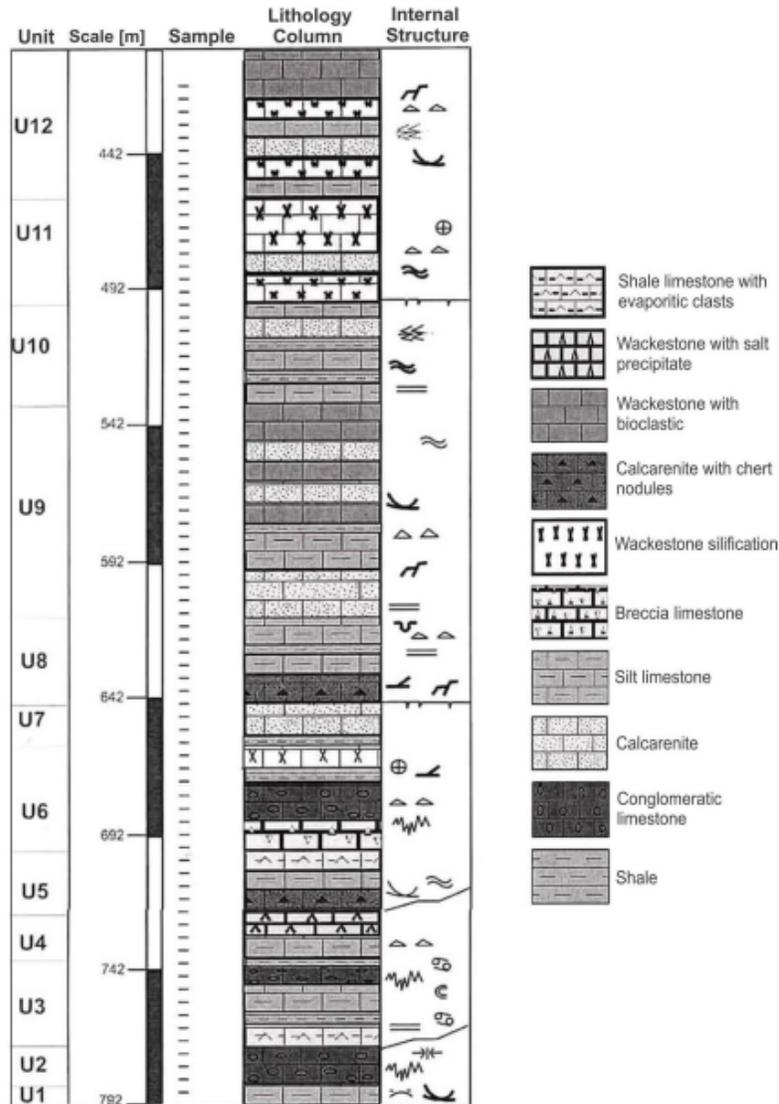


Fig. 2.8 Columna litológica del pozo Yax-1, a partir de 404 a 795 metros. Columna de EscobarE.,(2011), Tesis Doctoral.

### Registros de Propiedades petrofísicas y mediciones de laboratorio.

Para generar el sismograma sintético con los datos medidos en el laboratorio de velocidad de onda P y densidad de los núcleos obtenidos de la perforación del pozo Yax-1, así como realizar el análisis de las imágenes sísmicas, para el presente estudio, se selecciona un intervalo de interés a partir de la información de pozo y la columna litológica.

La profundidad en la que se está haciendo este análisis se encuentra entre los 400 y 670 metros; este intervalo corresponde a una sección representativa del Terciario Temprano (Paleógeno), de hace 65 a 39 millones de años aproximadamente.

### Densidad

El registro de densidades fue obtenido mediante la medición hecha en el laboratorio a los núcleos obtenidos de la perforación, se tomaron 101 muestras de acuerdo al intervalo de profundidades, que corresponde a la sección del Paleógeno.

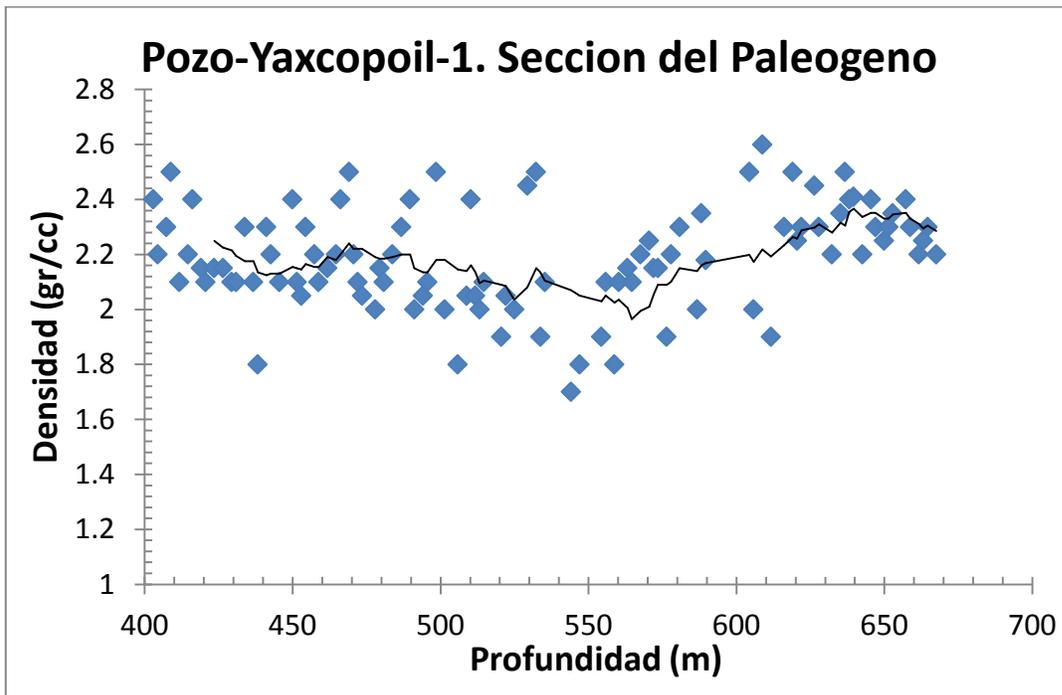


Fig. 2.9 Propiedades Petrofísicas del Pozo Yax-1-Densidad ( $\rho$ ).

Aquí se muestra el registro de densidad del pozo Yax-1; en el gráfico se le adiciona una media móvil, esto con el objetivo de ver mejor la tendencia de los datos.

En la figura antes mencionada, muestro el registro de Densidad, en el eje horizontal se marca la densidad, y en el eje vertical se marcan las profundidades, esto con la finalidad de realizar correlaciones más adelante. Podemos notar que la variación de la densidad con respecto a la profundidad es bastante similar y existe una correlación muy marcada con los datos de velocidad de onda P. (Fig. 2.14).

A partir del registro de densidad, Sancén (2011) en su tesis de licenciatura, clasifica de acuerdo al cambio de densidades, el registro en 3 secciones: entre los 400 a 530 metros (Fig. 2.10), entre los 530 y 610 metros (Fig. 2.11) y entre los 605 y 670 metros (Fig. 2.12) caracterizadas por tendencias distintitas en las densidades de los estratos.

La sección 1 (Fig. 2.10) , abarca de los 400 a los 530 metros, y esta a su vez puede dividirse en subsecciones debido al cambio de densidad, ya que en los 435 y 505 metros hay una disminución de la densidad a 2gr/cc; Así pues podemos dividir la sección en tres subsecciones: la primera (1A), hasta los 435 metros, en el cual se observa que las densidades disminuyen de 2.4 a 2 gr/cc; la segunda sección (1B), va de los 435 a 505 metros, cuya media es de 2.2 gr/cc; la tercera subsección (1C), la encontramos de 505 a 535 metros, en donde la densidad aumenta de 2.2 a 2.5 gr/cc.

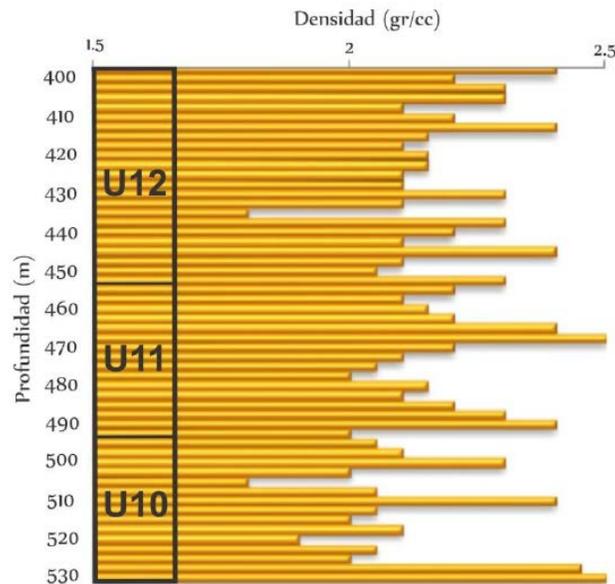


Fig. 2.10 Sección 1 a partir del registro de densidad, Sancén (2011). Se muestra la correlación con las unidades lito estratigráficas de Escobar (2011).

Así pues, podemos hacer la correlación con la columna litológica de Escobar antes mostrada. La sección 1 correlaciona con tres unidades lito-estratigráficas 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).

En la sección 2 (Fig. 2.11), abarca de los 530 a los 610 metros, y cuyas densidades aumentan desde los 2.1 gr/cc a 2.5 gr/cc; esta sección correlaciona con la unidad 9 (U9), la cual abarca desde 532 a 622 metros aproximadamente.

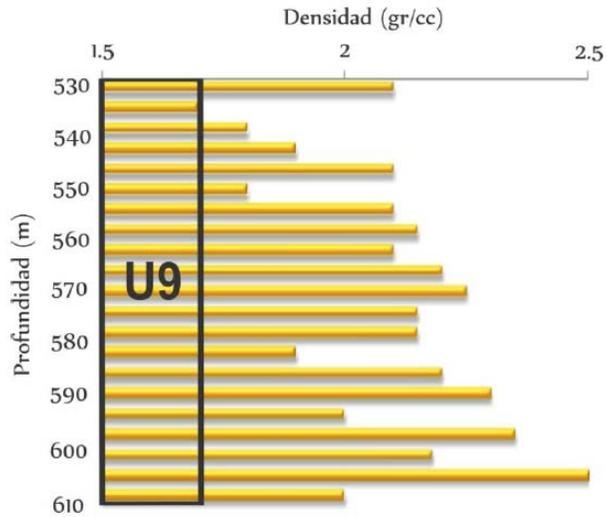


Fig. 2.11 Sección 2 a partir del registro de densidad, Sancén (2011). Se muestra la correlación con la unidad lito-estratigráfica de Escobar (2011).

La sección 3 (Fig. 2.12), Abarca de los 610 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; esta sección correlaciona con las unidades 8, 7 y 6 (U8, U7, U6).

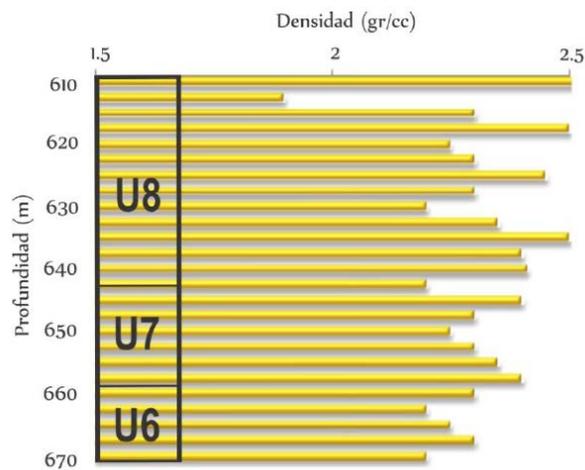


Fig. 2.12 Sección 3 a partir del registro de densidad, Sancén (2011). Se muestra la correlación con las unidades lito-estratigráficas de Escobar (2011).

## Velocidad de Onda P (Vp)

Para obtener este registro de Velocidad de onda P, se tomaron mediciones de los mismos núcleos de donde se determino la densidad para el registro anterior, así pues, la profundidad permanecerá constante para ambos registros.

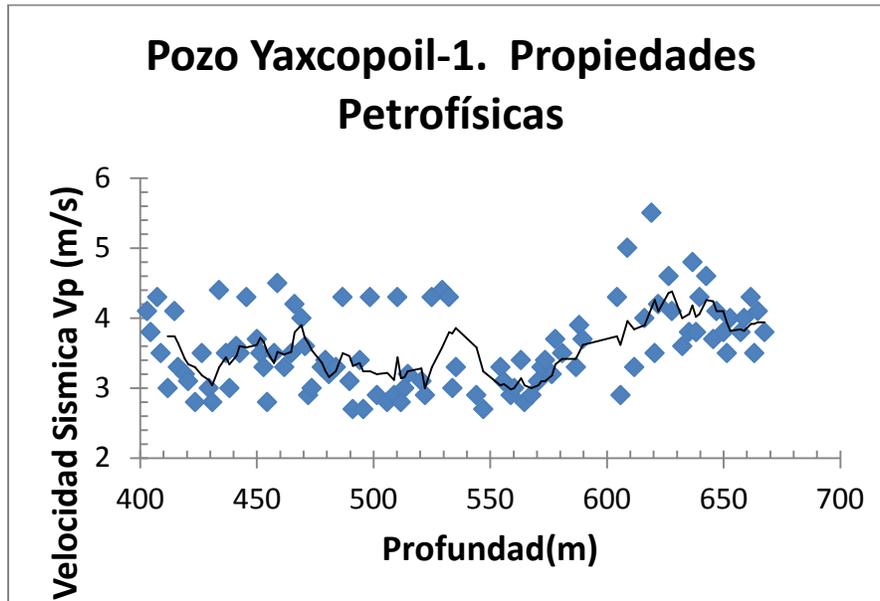


Fig. 2.13 Propiedades Petrofísicas del Pozo Yax-1- Velocidad de Onda P (Vp).

Aquí se muestra el registro de velocidades de onda P en el pozo Yax-1; así mismo se le aplica una media móvil, para así poder observar mejor la tendencia de los datos, para más adelante realizar el cambio de profundidad a tiempo, se calculó la velocidad promedio de los datos, dando esta de 3.616 [m/s], siendo posible observar la similitud de la tendencia de los datos (cambios abruptos), entre densidades y velocidades, en los 530 y 600 metros aproximadamente.

En la figura que se muestra a continuación, muestra el registro de Velocidad de onda P, en el eje horizontal se marca la velocidad, y en el eje vertical se marcan las profundidades.

Las velocidades Vp varían en un rango entre 2.7 y 5.5 km/s. Se puede notar que la variación de la Velocidad con respecto a la profundidad es bastante similar y existe una correlación muy marcada con el registro de densidad. (Fig. 2.9).

En el caso de este registro de Vp contra profundidad, resulta complicado la identificación de paquetes en el registro, sobre todo en los primeros 100 metros, debido a que se aprecia un cambio

de velocidades entre cada muestra, pero para hacer una buena separación de paquetes se requiere tener mayor número de mediciones para así poder observar la tendencia precisa de la velocidad y por ende tener una mayor precisión en la separación de los paquetes.

En el registro se pueden separar 3 paquetes debido al contraste de impedancias que se observa, el primero de los 400 a los 530 metros, el siguiente de los 530 a los 610 metros, y el tercero de los 610 a los 670 metros; estos paquetes son caracterizados debido al cambio tan marcado de velocidades entre estratos. La media en la primera sección e intervalo es de 3.4 km/s. En el segundo paquete 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.

## CAPITULO 3. FUNDAMENTOS TEORICOS

La Tierra da soporte para la propagación de las ondas sísmicas. Los terremotos son un ejemplo de este tipo de propagación. De ahí la importancia de estimar los factores involucrados en la propagación de las ondas sísmicas. Los métodos sísmicos de reflexión son parte de las técnicas de la geofísica de exploración que se encargan del estudio de ondas sísmicas con aplicaciones a la prospección de hidrocarburos.

Los métodos sísmicos, dado su gran poder de resolución y penetración, son las técnicas geofísicas más usadas. Se utilizan en la búsqueda de acuíferos; en ingeniería civil, en la exploración y producción de hidrocarburos y en la rama minera; además, todo pozo exploratorio de hidrocarburos y en muchos casos de desarrollo debe ser analizado mediante el empleo de datos sísmicos del área bajo estudio. El objetivo de los métodos sísmicos es pues, reconstruir la disposición de las rocas en el subsuelo (estructural) y sus características físicas (litologías, fluidos, etc.) a partir de la información grabada; esto es, de los tiempos de viaje, las amplitudes, cambio de fase y frecuencia, etc.

### 3.1. Método Sísmico de Reflexión

El método sísmico de reflexión representa una de las herramientas más importantes en el estudio detallada del subsuelo terrestre, permitiendo la visualización de rasgos estructurales, características deposicionales y configuración de las capas que conforman el interior de la tierra,

Básicamente consiste en emitir pulsos de energía en forma de ondas, los cuales se reflejaran en las interfaces entre las capas de rocas presentes en el área. La señal recibida es procesada analizada hasta obtener un conjunto de trazas sísmicas, que nos permitan visualizar e interpretar geológicamente los rasgos presentes.

## 3.2. Leyes fundamentales

La cinemática de las ondas sísmicas puede describirse a través de dos leyes fundamentales que son la Ley de Snell y el principio de Huygens.

### 3.2.1 Ley de Snell

La ley de Snell explica la relación de los ángulos de reflexión y refracción con las velocidades de los medios que definen interfaces. En un medio acústico, el ángulo incidente y el ángulo reflejado deben ser iguales. Sin embargo, en un medio elástico el incidente y el reflejado pueden ser diferentes ya sea para una onda P o S. La expresión de dicha ley es la siguiente:

$$\frac{\sin\theta_1}{v_1} = \frac{\sin\theta_2}{v_2} = p \quad \dots\dots \text{Ecuación (3.1)}$$

Donde  $\theta_1$ = ángulo incidente,  $\theta_2$ = ángulo reflejado,  $v_1$ = velocidad del medio 1,  $v_2$ =velocidad del medio 2,  $p$ =Parámetro del rayo.

### 3.2.2 Principio de Huygens

La ley de Huygens establece que cada punto de un frente de onda puede ser considerado como una nueva fuente de onda.

## 3.3. Ondas

Son perturbaciones que se propagan en el espacio y en el tiempo, sin que se necesite un medio para dicha propagación.

Las ondas sísmicas no causan deformación al propagarse y se dividen de la siguiente manera (Modificado de Ayala, 2005):

-Según el desplazamiento de las partículas:

+Ondas Transversales: la oscilación de las partículas es perpendicular a la propagación de la perturbación

+Ondas Longitudinales: la oscilación de las partículas tiene la misma dirección de la propagación.

- a. Según las dimensiones consideradas: unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales.
- b. Según el comportamiento de la propagación con respecto al tiempo: periódicas y no periódicas.

### 3.3.1 Ondas Sísmicas como señal analítica

Las ondas sísmicas que normalmente son detectadas y grabadas, pueden ser vistas como señales analíticas, con una parte real y otra imaginaria, de las cuales solo la parte real es detectada y mostrada. Esto es equivalente a un fasor dependiente del tiempo. Bajo este punto de vista la traza sísmica ( $g(t)$ ) puede ser expresada:

$$g(t) = R(t)\cos\theta(t) \quad \dots \text{ Ecuación (3.2).}$$

Dónde  $R(t)$  es la envolvente de la traza sísmica y  $\theta(t)$  es la fase.

Podría imaginarse un vector perpendicular al eje del tiempo (Fig. 3.1) cuya longitud varia con el tiempo; además este vector rota alrededor de dicho eje como función del mismo.

La proyección de este vector rotante en el plano real es la traza sísmica convencional y la proyección en el eje imaginario es la traza cuadratura ( $h(t)$ ).

$$h(t) = R(t)\sin\theta(t)\dots \text{ Ecuación (3.3)}$$

Al aplicar la transformada de Hilbert se puede generar la traza cuadratura a partir de la traza real observada. (Taner y Sheriff, 1977)

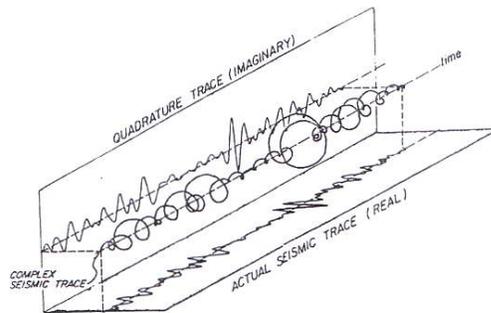


Fig. 3.1 Componentes real e imaginaria de la Traza sísmica Compleja  
(Modificación de Taner y Sheriff, 1977)

### 3.3.2 Impedancia Acústica

La impedancia acústica ( $Z$ ) es la multiplicación del valor local de la velocidad de la onda P con la densidad de la roca (Ec. 3.4)

$$Z = \rho * Vp \dots \dots \dots \text{Ecuación (3.4)}$$

Debido a que la impedancia es función de la densidad y la velocidad (Fig. 3.2) y estos parámetros dependen de la porosidad, litología, tipo de fluido dentro de la roca, saturaciones entre otros, resulta de utilidad para predecir cambios en secciones y mapas (producto de inversiones sísmicas) de dichos parámetros, aunque debe ser visto con cuidado ya que más de uno de estos parámetros puede variar al mismo tiempo dentro del yacimiento.

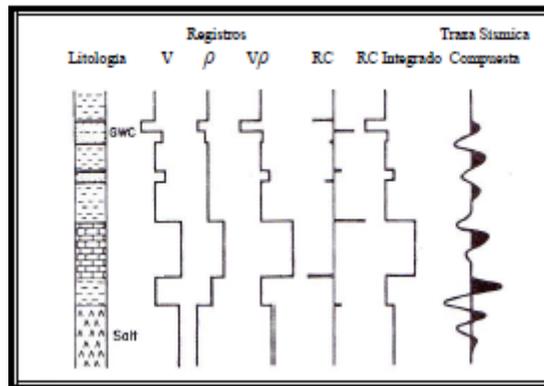


Fig. 3.2. Composición de una traza a partir de los contrastes de velocidades y densidades (Modificación de Tearpock, 1991).

### 3.3.3 Coeficiente de Reflexión

El coeficiente de reflexión es la relación existente entre las amplitudes de la onda reflejada y la incidente. Se supone que la onda incidente tiene una magnitud de uno, la reflejada R y la transmitida 1-R.

El coeficiente de Reflexión (R) es una función de las velocidades y las densidades de dos medios adyacentes a una interfaz. Para una onda viajando de un medio 1 y reflejada desde una interfaz de un medio 2, R esta dado por:

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \dots\dots \text{Ecuación (3.5)}$$

Los valores típicos de R son aproximadamente -1 del agua al aire, que significa que cerca del 100% de la energía es reflejada y ninguna es transmitida; aproximadamente 0.5 del agua a la roca; y aproximadamente 0.2 de la lutita a la arena. A incidencia no normal el coeficiente de reflexión definido como una relación de amplitudes depende de otros parámetros, tales como las velocidades de ondas S y es descrita como función del ángulo de incidencia por las ecuaciones de Zoeppritz.

### 3.3.4 Ondícula

Se define como un pulso que consiste usualmente en pocos ciclos (Sheriff, 2002).

Se pueden considerar las ondícula fase cero y fase mínimas (Figura 3.3). Las primeras son aquellas que son simétricas y su pico está ubicado en cero, son generadas en su mayoría por ondícula vibro-sísmicas, mientras que las ondículas fase mínima son asimétricas y se generan en su mayoría por explosivos.

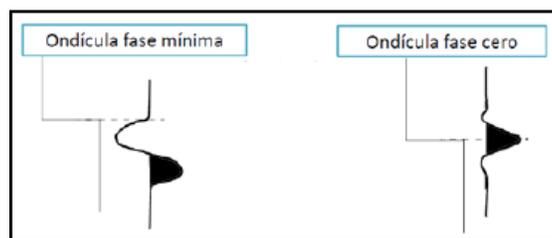


Figura 3.3 Fases de las ondículas (Bolt, 1976).

En la interpretación sísmica se recomienda el uso de ondículas fase cero por las siguientes razones (Liner, 2004):

- a. Son simétricas por lo que se obtiene una resolución vertical óptima.

- b. Son bastantes agudas (semejantes a un pulso) debido a que los lóbulos laterales han sido minimizados.
- c. Su amplitud pico se localiza en el centro de la ondícula.

### 3.3.5 Ondícula de Ricker

Es la ondícula mas empleada para el efecto del modelado. Se caracteriza por ser una señal simétrica. La señal es fase cero debido a que posee un valor máximo, el cual es bastante alto en comparación a sus lóbulos de energía; como se menciona es una señal simétrica (posee optima resolución vertical); y el valor máximo de la ondícula se corresponde con el coeficiente de reflexión R. La expresión matemática de esta ondícula es:

$$w(t) = a^2 * e^{-\frac{(a*t)^2}{2}} * (a^2*t^2 - 1) \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación (3.6).}$$

Es la ondícula mas empleada en la industria para generar modelos sísmicos, sismogramas sintéticos, por lo general se usa en registros sísmicos convencionales, con una frecuencia dominante de 40 Hz según Liner (1999).

### 3.3.6 Sismograma Sintético

Corresponde a un modelo directo unidimensional de la energía acústica que viaja a través del interior de la tierra. Su resultado predice la respuesta sísmica de la tierra.

Se generan a través de la convolución de la serie de reflectividad (derivada de los registros sísmicos y de densidad) y las ondículas seleccionadas. (Ver Figura 3.4)

El modelo convolucional de la traza sísmica asume que la tierra es un medio homogéneo e isotrópico y está definido de la siguiente manera:

$$S(t) = w(t) * r(t) + n(t) \dots\dots\dots\text{Ecuación (3.7)}$$

Donde, S(t) = Sismograma Sintético

$w(t)$  = ondícula

$r(t)$  = serie de reflectividad

$n(t)$  = ruido aditivo

El modelo convolucional parte de una serie de suposiciones o hipótesis (Yilmaz):

1. El sistema físico a explorar (el subsuelo) es LTI (Lineal e invariante en tiempo) y está compuesto de capas planas horizontales de velocidad constante.
2. La fuente genera una onda compresional plana que atraviesa las interfaces en forma normal. Esto implica, que no hay una conversión de onda P a S.
3. La forma de la ondícula no cambia a medida que ocurre la propagación en el medio (no hay dispersión).
4. La forma de la ondícula es conocida.

El modelo convolucional asume que la traza sísmica es originada a partir de la convolución de una ondícula fuente con la serie de reflectividad (que es un conjunto de coeficientes de reflexión que se calcula para cada interface). El sismograma representa las posibles respuestas de incidencia normal en la zona de estudio.

La componente de ruido no existe como tal en la convolución, sino es una componente aditiva. La razón de ello es que el modelo convolucional es un modelo que parte de una serie de suposiciones, al agregarle la componente de ruido al modelo convolucional sería complicado la extracción de la respuesta impulsiva de la tierra.

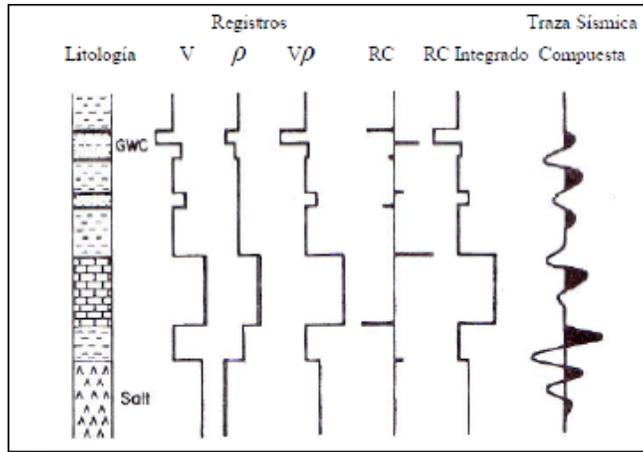


Figura 3.4 Sismograma Sintético a partir del modelo convolucional (Modificado de Tearporck, 1991).

### 3.4 Resolución Sísmica Vertical

Se entiende como resolución sísmica vertical la menor distancia vertical entre dos interfaces litológicas que produce dos reflexiones discretas, las cuales pueden separarse visualmente (Regueiro).

En sísmica la resolución vertical concierne al espesor mínimo de una capa, en la cual las reflexiones provenientes de su tope y de su base pueden ser distinguidas.

El criterio de Rayleigh establece que el límite de resolución es de un cuarto de la longitud de onda dominante. (Sheriff, 1997). (Fig. 3.5).

Dónde:

$$r = \frac{\lambda}{4} \dots \dots \dots \text{Ecuación (3.8)}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \dots \dots \dots \text{Ecuación (3.9)}$$

V: velocidad intervállica de los estratos

f: frecuencia

$$\text{Siendo, } V = \frac{1}{L} \dots \dots \dots \text{Ecuación (3.10)}$$

L: lentitud obtenida a partir del registro sísmico

$$f = \frac{n}{t} \dots \dots \dots \text{Ecuación (3.11).}$$

n: número de ciclo

t: tiempo

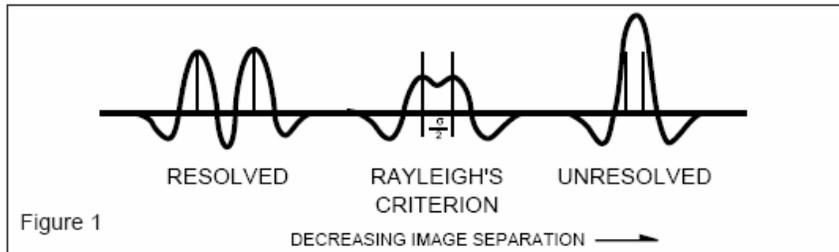


Fig. 3.5 Criterio de resolución (Modificado por Sheriff, 1997).

### 3.5 Inversión Sísmica

La Inversión Sísmica Estratigráfica consiste en obtener la impedancia del subsuelo a partir de datos sísmicos de un ancho de banda limitado.

El principal objetivo de la inversión sísmica es transformar reflexiones sísmicas en propiedades de roca que permita la descripción de un yacimiento. Entre los beneficios de la inversión sísmica se tiene los siguientes (Pendrel, 2001):

- Se reducen los efectos producidos por la ondícula.
- \_ Existe la posibilidad de extender la data fuera del ancho de banda de la sísmica.
- \_ Variaciones areales en la impedancia acústica pueden revelar cambios en litología y porosidad, permitiendo la predicción de propiedades del yacimiento como la porosidad, espesor de arena entre otros.
- \_ Permite atenuar el ruido aleatorio.

### 3.6 Determinación de Velocidades

En la etapa de interpretación de los datos sísmicos es necesario conocer las velocidades con las cuales se propagan las ondas elásticas dentro de las distintas capas del subsuelo, tanto al ingresar a

partir del punto de impacto en la superficie, como su regreso a la superficie después de haberse refractado o reflejado en algún contacto que presente contraste de velocidades.

El control de las velocidades, así como su distribución, son esenciales para convertir los tiempos observados a profundidades, y el grado de aproximación con que se conozcan las velocidades determina la exactitud de la interpretación y por lo tanto la posición de las capas del subsuelo y la relación entre ellas.

La velocidad de transmisión de las ondas elásticas depende de las propiedades elásticas del medio en el cual se propagan, y en términos geológicos depende en mayor grado de la compacidad y del estado de consolidación de la formación o capa geológica.

Por lo general la porosidad decrece al aumentar la profundidad de sepultamiento y de la presión de las capas superiores, y por lo tanto la velocidad aumenta con la profundidad. Las constantes elásticas también dependen de la presión. La variación de la velocidad con la profundidad, usualmente mencionada como función de velocidad, con frecuencia se manifiesta como un incremento sistemático razonable a medida que se alcanzan mayores profundidades.

En lo que respecta a la prospección sísmica, particularmente en la técnica de reflexión, el tener conocimiento de la velocidad es de suma importancia para poder convertir los tiempos registrados en profundidades, y así para poder aplicar todas las correcciones estáticas y dinámicas, y en algunas técnicas de datos lo que se conoce como velocidad de apilamiento. Dentro de las formas más efectivas para conocer valores precisos de velocidades sísmicas es mediante observaciones directas en un pozo, o bien, por medio de una sección de refracción, pero, desde el punto de vista económico y práctico, solo se pueden hacer para capas superficiales, y en las operaciones normales de la técnica de reflexión, solo se permiten valores aplicables a las correcciones estáticas, las cuales son determinadas en algunos lugares del área por explorar y son generalizadas, lo cual puede producir correcciones inapropiadas si las condiciones superficiales son muy variables.

Cuando nuestro objetivo son capas profundas, necesitamos conocer la distribución de velocidades en toda la columna geológica arriba del objetivo, lo cual normalmente no es posible, ya que los

pozos, se perforan después de los estudios de prospección, y esto nos lleva, a que en muchos casos es necesario utilizar una ley de velocidades que haya sido determinada cerca del área de estudio.

Para las correcciones dinámicas y velocidades de apilamiento, es necesario tener una idea de las velocidades medias a cada una de las capas reflectoras, y para ello, lo único de lo que se dispone, son los registros de campo de los cuales se pueden obtener valores aproximados, los cuales actualmente se ajustan por medio de aproximaciones sucesivas utilizando algunos programas de computadora que están disponibles.

### **3.6.1 Determinación Directa de Velocidades en Pozo Profundo**

En la actualidad se manejan tres formas de determinación de velocidades en pozo: los registros acústicos mejor conocidos como "sónicos", la determinación directa de velocidades y el perfil sísmico vertical (VSP).

### **3.6.2 Registro Sónico**

El registro sónico es uno de los registros de pozos desarrollados por la Cía. Schlumberger para determinar diferentes aspectos de las formaciones geológicas que se atraviesan durante la perforación de pozos profundos.

El objetivo fundamental del uso del registro sónico es obtener datos de porosidad de las rocas para determinar la saturación de fluidos, establecer las propiedades mecánicas de diferentes litologías, los contrastes de propiedades en formaciones que contienen gas, determinación de fracturamiento hidráulico, evaluación de capas delgadas y monitoreo de yacimientos. Todas estas características influyen de alguna forma en la velocidad con la que una onda sónica se transmite a través de las rocas adyacentes al agujero del pozo, y las mediciones que se hacen permiten conocer las velocidades sísmicas en los intervalos de muestreo, los cuales se hacen de manera continua dentro del pozo.

La técnica consiste en introducir en un pozo una herramienta conocida como sonda, que se hace bajar dentro del pozo de forma continua, haciendo mediciones de velocidad a cada profundidad por la que pasa la sonda.

La herramienta consiste en fuentes sónicas ubicadas en la parte superior de la sonda y de un grupo de detectores que se localizan en la parte inferior, y que están alineadas a lo largo del eje axial del pozo. Las sondas pueden tener diferentes arreglos de geófonos, en sistemas uni-axiales, biaxiales o tria-xiales, para detectar arribos de energía sísmica en una, dos o tres dimensiones, distribuidos de tal manera que detecten el tipo de onda que se desee obtener, por ejemplo los de tres dimensiones ( x,y,z ) permiten detectar ondas , P, SV y SH que se propagan en las formaciones.

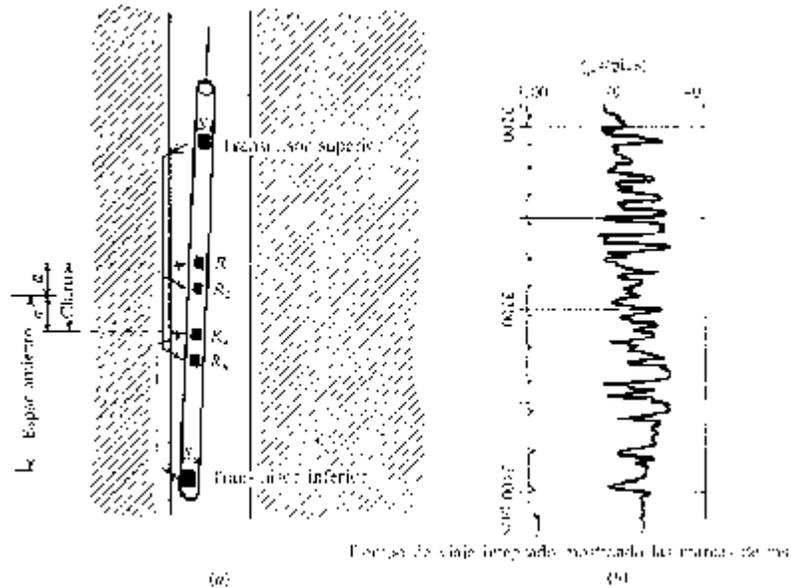


Figura 3.6 Imagen de la herramienta usada para la toma de un Registro Sónico. Tomada de Vasiuni.

Algunas herramientas disponen de un arreglo de sensores que se desacoplan de la sonda y se adhieren a la parte del pozo para obtener datos de mayor calidad.

Actualmente hay tres herramientas sónicas en uso: el BHC o registro sísmico compensado, el LSS o registro sísmico de espaciado largo y la herramienta Array-Sonic. Aunque toda la forma de onda puede ahora registrarse con cualquiera de estas herramientas, solo la Array-Sonic ha sido diseñada para proporcionar un registro completo de la forma de onda como una característica estándar.

La sonda se encuentra unida a un dispositivo electrónico en donde están protegidos los módulos electrónicos que corresponden al hardware necesario para la obtención de los datos.

La herramienta BHC, contiene un transductor que es excitado por una señal sónica de frecuencia en el rango de 20 a 40 kHz.

Conforme avanza la onda dentro del pozo, genera una onda sónica que se propaga en todas direcciones pasando a través del lodo sobre la pared del pozo que se transmite dentro de la roca adyacente al pozo, la que posteriormente va a ser detectada en los receptores que se encuentran a cierta distancia del transmisor y que se encuentra a lo largo del eje de la herramienta, registrándose los tiempos de viaje desde el transmisor a cada uno de los detectores.

La diferencia de tiempo de registro  $\Delta t$  entre los detectores se conoce como el tiempo de tránsito, y es inversamente proporcional a la velocidad de la onda sónica dentro de la formación y directa con la distancia entre los detectores R1 y R2.

$$\Delta T = TR2 - TR1 = \text{Dist.} / V$$

Los tiempos son registrados y las velocidades calculadas para cada una de las profundidades en la que se ubique la sonda, lo cual se hace de manera continua, aunque para su análisis se hace en "ventanas" predeterminadas.

La penetración de la señal depende de la separación entre fuente y receptores.

Las mediciones se hacen en el interior del pozo que está lleno de fluidos de perforación, y aunque la señal normalmente es un tren de ondas, solo se utilizan los primeros eventos sísmicos correspondientes a las ondas de cuerpo que se transmiten dentro de las formaciones de la Tierra.

El registro sísmico puede integrarse automáticamente para establecer los tiempos totales de viaje en función de la profundidad, que puede identificarse a intervalos de un metro, lo que permite conocer variaciones de velocidad en tramos pequeños, lo cual no es relevante cuando solo se intenta conocer las velocidades medias a las diferentes capas reflectoras, que por otro lado propicia que se acumulen algunos errores sistemáticos en la integración final, que pueden proporcionar velocidades superiores a las reales.

Para disminuir errores se acostumbra hacer tiros de comprobación y de ajuste en la base y la parte superior del registro sísmico por el método convencional de determinaciones de velocidades en pozo profundo.

En muchos de los procesos digitales de la información sísmica que se han desarrollado para determinar diferentes características de yacimientos petrolíferos es importante conocer velocidades de intervalo, que corresponden a las formaciones productoras, lo que ha hecho común el uso de los datos obtenidos con los registros sísmicos, así como para generar sismogramas sintéticos que son utilizados en la interpretación de la información sísmica en áreas complejas y difíciles.

### 3.7 Atributos Sísmicos

A partir de que se implanto la sísmica 3-D los atributos sísmicos se han adquirido gran popularidad (Brown, 2001). Los atributos sísmicos son medidas específicas de características geométricas, cinemáticas, dinámicas o estáticas provenientes de los datos sísmicos. (Chen y Sydney, 1997). Los atributos pueden presentar información fundamental de los datos sísmicos: tiempo, amplitud, frecuencia y atenuación.

El análisis de atributos sísmicos inicia su desarrollo a partir de la introducción a la exploración geofísica de la grabación digital y el descubrimiento subsecuente de puntos brillantes en la década de los 60's. Esto permitió que los geofísicos reconocieran que había más que aprender de los datos sísmicos.

Las técnicas de procesado digital de señales permiten reconocer y resaltar las variaciones en la amplitud de las reflexiones. Varios grupos en la industria petrolera reconocieron su alto potencial en el procesado de datos e interpretación. No obstante, la relación entre las reflexiones sísmicas de amplitud alta y la presencia de gas y aceite tomo tiempo para que se aceptara como posible y se investigara en mayor detalle. A estas reflexiones fuertes eventualmente se les llaman puntos brillantes (bright spots) por el grupo de exploración Shell Oil. La correlación de los puntos brillantes con datos petrofísicos de velocidad y densidad, demostró el potencial del método para la detección de aceite y gas y permitió popularizarse sus técnicas de procesado e interpretación.

Se han desarrollado cientos de atributos. Para hacer un uso eficiente de ellos, se han propuesto diferentes categorías (Brown, 2001; Chen, 1997; Taner, 1995). Por ejemplo: Taner clasifico los atributos de diferentes formas, una de ellas, en dos clases: los Atributos Geométricos y los Atributos Físicos (Taner 2001). Brown clasifico los atributos de dos maneras: Pre- apilado y Pos-apilado, proponiendo cuatro categorías para los datos Pos-apilados: Tiempo, Amplitud, Frecuencia y

Atenuación (Brown, 2001). Los atributos Pre- apilado se recomiendan para estudios avanzados y que tienen como objetivo caracterizar a detalle, pero no son recomendables para estudios iniciales por que requieren grandes cantidades de cálculo y tiempo de proceso. Los atributos pos- apilado se sugieren para analizar grandes cantidades de datos en una investigación inicial, donde los datos pueden estar apilados y/o migrados.

Los atributos sísmicos tienen su periodo inicial con el Análisis de la traza compleja. Este análisis tiene la premisa de considerar la onda sísmica, atravesando un medio geológico, como un fasor (vector rotatorio al eje del tiempo) en el espacio (tres dimensiones) con una variable compleja (fig. 3.7). La estructura matemática a través de las Funciones Integrales Lineales y el Teorema de Convulación, estaba dada para poder resolver la amplitud y fase de la función envolvente de la traza compleja. Las funciones Amplitud y Fase, con respecto del tiempo, son los atributos instantáneos elementales ya que a partir de ellos se construyen muchos otros atributos que se conocen hoy en día.

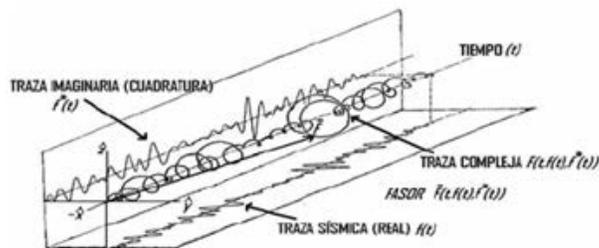


Figura 3.7 La función Traza Compleja, es un fasor que gira en torno al eje del tiempo, t. La traza imaginara  $f(t)$  y la traza real  $f(t)$  son proyecciones de la Traza Compleja. Figura modificada de Taner et, al 1979.

### 3.7.1 Análisis de Traza Compleja y los Atributos Instantáneos de Amplitud, Fase y Frecuencia

El análisis de Traza compleja considera un frente de ondas (perturbada en su amplitud fase y frecuencia cuando atraviesa un medio estratificado) como una traza compleja  $F(t, f(t), f^*(t))$ . Esta traza es la sucesión de puntos representados por un fasor  $\bar{F}(t, f(t), f^*(t))$  (vector que gira en torno al eje del tiempo), en un espacio complejo de tres dimensiones (dos dimensiones son reales y una compleja), que está en función del tiempo, t; la traza real,  $f(t)$  y la traza compleja,  $f^*(t)$ .

La traza compleja o analítica es:

$$\bar{F}(t, f(t), f^*(t)) = \hat{x}t + \hat{y}f(t) + \hat{z}jf^*(t) \dots \dots \dots \text{Ecuación (3.12)}$$

$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$  : vectores unitarios ortogonales.

J: Unidad compleja

t: Tiempo

f(t): Traza sismica

$f^*(t)$ : Transformada de Hilbert de f(t).

La traza real es la traza sismica, f(t),

$$f(t) = A(t)\cos\theta(t) \dots \dots \dots \text{Ecuación (3.13)}$$

La traza imaginaria o cuadratura,  $f^*(t)$ , es la Transformada de Hilbert de la traza real, f(t).

$$f^*(t) = A(t)\sen\theta(t) \dots \dots \dots \text{Ecuación (3.14)}$$

El analisis de Traza compleja, con el proposito de simplificar la caracterizacion del fasor  $\bar{F}(t, f(t), f^*(t))$ , propone lo siguiente:

- 1) La traza real e imaginaria sean modeladas matematicamente como una sucesion continua de ondas senoideales, y esten determinadas por el producto de dos funciones dependientes del tiempo (pero linealmente independientes entre ellas): la Amplitud  $A(t)$  y la fase  $\theta(t)$ .
- 2) Determinar la amplitud  $A(t)$  y fase  $\theta(t)$  de la traza compleja y no del fasor; cortando (ortogonalmente) el eje del tiempo con planos  $\hat{z}$  vs  $\hat{y}$ . De este modo, traslada el sistema de referencia al tiempo en donde quiere calcular el valor de  $f(t)$  y  $f^*(t)$ (fig. 3.7).

De acuerdo con las dos propuestas anteriores, sustituimos las ecuaciones 3.7.2 y 3.7.3 en 3.7.1 y obtenemos una funcion  $F(f(t), f^*(t))$  conocida  $f(t)$  y  $f^*(t)$ , nos permite calcular la amplitud y fase de la Traza Compleja para todo tiempo.

$$F(f(t), f^*(t)) = f(t) + jf^*(t) = A(t)\cos\theta(t) + jA(t)\sin\theta(t) = F(A(t), \theta(t)). \text{Ecuación (3.15)}$$

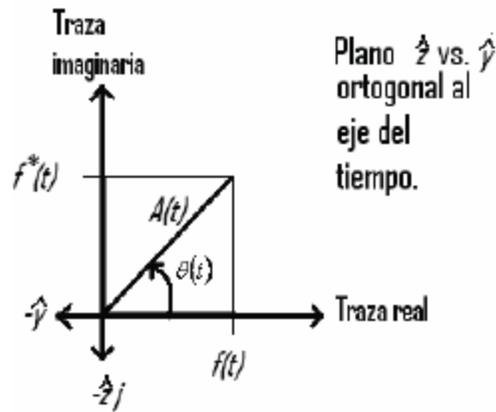


Figura 3.8  $A(t)$  es la longitud de la proyección del fasor  $\bar{F}(t, f(t), f^*(t))$  en el plano  $\hat{z}$  vs  $\hat{y}$ , en el tiempo  $t$ . La amplitud  $A(t)$  se descompone por dos elementos: La traza real (sismica)  $f(t)$  y la traza imaginaria  $f^*(t)$  (transformada de Hilbert de  $f(t)$ ).

De acuerdo con la Fig. 3.8, la amplitud de la función envolvente de la traza compleja es la magnitud o norma de la proyección del vector  $n$  en el plano  $\hat{z}$  vs  $\hat{y}$ , este plano es ortogonal al eje del tiempo, en el tiempo  $t$  que se desea conocer el valor de la amplitud de la envolvente. La magnitud es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las proyecciones del vector traza compleja  $\bar{F}(t, f(t), f^*(t))$  en el plano  $\hat{y}$  vs.  $\hat{z}$ .

El análisis de traza compleja logra calcular los atributos sísmicos  $A(t)$ ,  $\Theta(t)$  y  $w(t)$  por que conoce la función  $f(t)$  y  $f^*(t)$  (transformada de Hilbert de  $f(t)$ ). En la práctica, los programas de cómputo no calculan la transformada de Hilbert en el dominio del tiempo por que las operaciones son complicadas y toman mucho tiempo de proceso (Barnes, 2007). Por ello, resulta más eficiente, obtener la traza compleja en función de la frecuencia; aplicando la Transformada de Fourier a la traza real e imaginaria (Transformada de Hilbert).

### 3.7.2 Atributo instantaneo de envolvente de amplitud

De acuerdo con el Analisis de Traza Compleja, la Envolvente de Amplitud representa la energia de la onda sismica que se transmite a traves de diferentes medios geologicos. De este modo, la amplitud aumenta o disminuye si atraviesa una interface o un grupo de interfases con diferentes impedancias acusticas (dependiendo el ancho de banda de la onda). Por ejemplo, si la onda proviene de un medio de alta velocidad e ingresa a un medio de baja velocidad, entonces la amplitud tendra un aumento respecto del medio anterior. En un ejemplo opuesto, si la onda proviene de un medio de baja velocidad y entra aun medio de alta velocidad, la amplitud disminuira. Los fenomenos de difraccion, dispersion y superposicion influyen frecuentemente en los valores de la amplitud de onda. Una onda sismica que se propaga en un banco de sal o en una zona fragmentada o con fallamiento se observa como una zona de baja energia, sin reflectores brillantes.

Este Atributo fisico de Envolvente de Amplitud puede ser usado como un discriminador efectivo para las siguientes características (Taner et al., 1995):

Representa el contraste de impedancia acustica,

Eventos brillantes,

Posibles acumulaciones de gas,

Limites de secuencias,

Discordancia,

Cambios de litologia,

Cambios en ambientes de deposito,

Cambios laterales que indican fallamiento,

Correlacion espacial con porosidad y otras variaciones litologicas.

### 3.7.2 Factor de calidad Q instantaneo

Barnes sugiere que el factor de calidad instantaneo  $q(t)$  puede definirse por la expresion:

$$q(t) = -\pi * freq(t)/decay(t).....Ecuación (3.16)$$

Donde el  $decay(t)$  es la relacion de decaimiento instantaneo que se define como la derivada de la envolvente instantanea dividida por la envolvente.

La proporción de decaimiento puede tomar los valores positivos y negativos. Donde el factor de calidad instantaneo es la proporción de frecuencia instantaneo a dos veces el ancho de banda instantaneo. Barnes señala que esta definicion es consistente con las definiciones estandar del factor de calidad (Close, 1996, Johnson y Toksoz, 1981). Se debe señalar que este calculo de Q es la variacion de la longitud de onda corta del valor de Q. Por lo tanto da los valores relativos.

Este es un atributo similar al intervalo y las velocidades instantaneas. Tambien es un atributo fisico con una fuerte relacion a la porosidad, permeabilidad y fractura.

Este atributo indica la variacion local del factor de Q, y es similar al calculo de impedancia acustica relativa de la traza sismica. La variacion de impedancia acustica relativa de la traza sismica. La variacion de la longitud de onda mas larga debe calcularse por la division espectral y debe agregarse a este atributo para asi obtener mejores resultados.

Puede indicar el volumen liquido relacionando la presion contra la seccion de factor Q de onda cortada. Sus componentes de longitud de onda deben estimarse de una manera similar a la velocidad media y procedimientos de inversion de velocidad.

### 3.7.4 Atributo instantaneo de fase

El Atributo de Fase es independiente de la amplitud y enfatiza la continuidad de eventos, especialmente cuando el indice señal-ruido es alto. Este atributo tambien es catalogado como un atributo fisico y se puede usar como un discriminador para clasificaciones de formas geometricas (Taner et al., 2001):

Es indicador de continuidad lateral.

Señala la componente de fase de la propagación,

Puede ser usado para calcular la velocidad de fase

No tiene información de amplitud, por lo tanto todos los eventos están representados.

Muestra discontinuidades

Fallas

Angularidades

Eventos con diferentes actitudes de echado

Límites de secuencias

Visualización detallada de las configuraciones de estratificación.

### **3.7.5 Atributo instantáneo de frecuencia**

De acuerdo con el Análisis de Traza Compleja, el índice de cambio de fase (ángulo entre fásor y el plano formado por el eje del tiempo y la traza sísmica), (fig. 3.7) respecto del tiempo es el Atributo de Frecuencia. La mayoría de los eventos reflectivos, desplegados con este atributo, son el conjugado de reflexiones individuales provenientes de reflectores muy cercanos el uno del otro y con contrastes de impedancia constantes. De este modo los eventos reflectivos producen patrones de frecuencia que caracterizan o correlacionan los reflectores. El patrón de frecuencias puede cambiar debido a que el carácter del conjugado de reflexiones cambia gradualmente con el grosor y la litología.

La frecuencia es un atributo físico que relaciona la propagación de la onda con el ambiente de depósito y puede ser (Taner et al., 1995):

Un correlacionador del carácter sísmico en dirección lateral.

Un indicador de las orillas de capas delgadas con baja impedancia.

Un indicador de hidrocarburos por medio de anomalías de baja frecuencia. Este efecto es algunas veces acentuado por la falta de consolidación debido al contenido de aceite en poros.

Indicador de zonas de fracturamiento, éstas pueden aparecer como zonas de baja frecuencia.

Un indicador de zonas de reflexion caotica, debido a difracciones.

Indicador del grosor de la capa.

## CAPITULO 4. METODOS

### 4.1 Adquisición

El esquema general del método identifica aspectos 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. Volumen 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 registrar previa amplificación de las señales sísmicas, que son muy débiles y poco perceptibles.

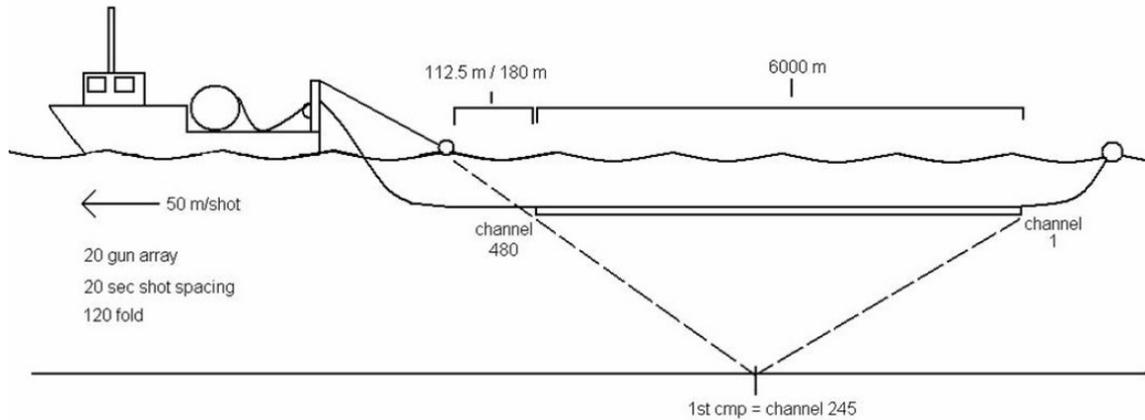


Fig.4.1 Esquema de adquisición en la campaña 1996.

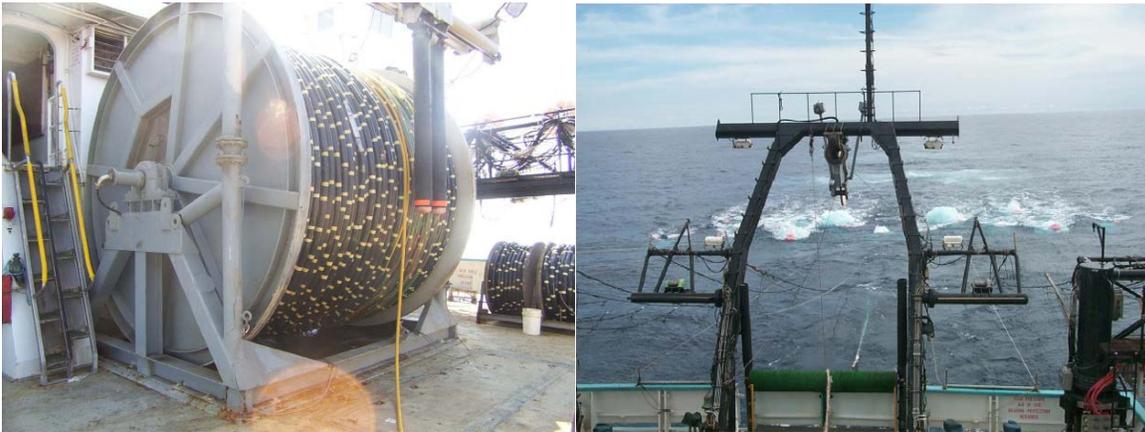


Fig.4.2 Fotografías del material usado y el tendido de hidrófonos para la adquisición de datos.

#### 4.1.1 Experimento Sísmico Chicxulub

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: A0 y A1, La línea B y la línea C. De las cuales para el presente trabajo solo se usara la línea C y A.

(Fig. 2.4):

- 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°30'N, 89° 35'W donde comienza la línea A1, que finaliza a los 21°55'N, 87° 35'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°30'N, 89°30'W, hasta los 22°40'N, 88°55'W.

Así como también serán usadas la línea A y A1.

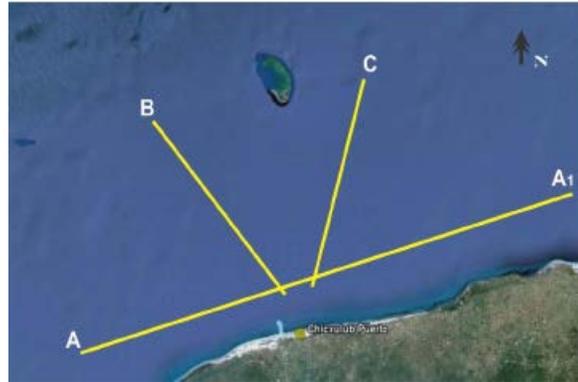


Fig. 4.3 Líneas Sísmicas A, A1, B y C, adquiridas en la campaña de 1996. Imagen base modificada de Google Earth, 2011.

El objetivo de estas observaciones fue visualizar 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 12.5m y 78 con separación de 50m.

Los datos de baja resolución fueron obtenidos con un tendido activo de 5925m de longitud y separación de hidrófonos de 50m. En los datos de alta resolución se utilizó un tendido de 2025m con un intervalo de disparo de 50m 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 4.1).

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

Tabla 4.1 Parámetros de adquisición, campaña 1996. Modificado de Salguero Hernández (2008)

## 4.2 Procesamiento

Desde el momento en que los datos de campo son introducidos en una estación de trabajo, comienza el procesamiento, y este lo podemos dividir en tres etapas (Yilmaz, 2001).

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

**-Grabación:** Los datos de campo son grabados en diferentes tipos de formatos, que deben ser compatibles con el software que será utilizado para el procesamiento.

**Aplicación de Geometría:** La aplicación de geometría es uno de los pasos más importantes del procesamiento, ya que de tener un error repercutiría en todo el procesamiento. Este paso consta de asignarle las coordenadas correspondientes a cada fuente y receptor.

**Editado de trazas ruidosas y cambio de polaridad.**

*Eliminación de trazas:* Durante la adquisición de datos, se pone mucho empeño en que el registro sísmico sea de buena calidad ya que esta parte del procesamiento es importante dentro del tratamiento de los datos; dado que los resultados posteriores van a depender del buen aislamiento de las reflexiones. Se excluyen, total o parcialmente, aquellas trazas que presentan ruido o malas conexiones. El mal funcionamiento del geófono implica la pérdida de una traza.

*Inversión de Polaridad:* Algunas trazas suelen presentar cambios de polaridad debido a efectos de sitio o de intercambio de conexiones.

**Picado de primeros arribos:** En sismica de reflexión se emplea el picado de primeros quiebres para el cálculo de las correcciones estáticas de refracción.

**Corrección por divergencia esférica:** Conforme la energía va viajando en el medio va atenuándose, esto se debe a diversos factores, como la absorción, dispersión, divergencia esférica y demás. El objetivo de esta corrección es recuperar las amplitudes debido a la absorción de las capas del subsuelo y al decaimiento del frente de ondas con la distancia.

*Escalamiento:* El escalamiento sirve para poner a un mismo nivel las trazas conservando la diferencia de amplitudes entre traza y traza.

**Aplicación de filtros:** Para la atenuación de ruido utilizamos los filtros, el cual tiene por objetivo atenuar el ruido y resaltar los eventos de reflexión. Un filtro es un operador, que actúa sobre la base de la frecuencia y la amplitud de los eventos en las trazas, así mismo también se pueden usar filtros que actúen sobre la coherencia o el número de onda de las trazas.

**Corrección estática por elevación:** El principal objetivo de esta corrección es ajustar el tiempo de viaje, al que se observaría si la fuente y los receptores estuvieran ubicados al mismo nivel, sobre el plano de referencia (*datum*) por debajo de la capa meteorizada (generalmente constituida por rocas y materiales no consolidados, de forma que su espesor varía desde cero hasta unos cuantos metros).

## 2.- Apilamiento.

**Ordenamiento CMP:** Una vez editados los registros de campo, se procede a realizar un reordenamiento de las trazas sísmicas en conjuntos de punto reflector común o CMP (*Punto Medio Común*). 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 receptores.

**Análisis de Velocidades:** Para mejorar la relación señal/ruido, es necesario tener información sobre la velocidad a la cual viajan las ondas sísmicas en el subsuelo, esta información es obtenida mediante el análisis de velocidades. Para realizar este proceso, como ya se mencionó anteriormente se ordenan las trazas en grupos de CMP determinados. El resultado del análisis es un campo de velocidades que se usará en el apilamiento para obtener la sección sísmica. Cuando hay poca precisión en el establecimiento de las velocidades de reflexión, la calidad de la sección apilada puede degradarse, ya que las reflexiones no se suman coherentemente.

El picado de velocidades es uno de los pasos más importantes en el procesamiento de los datos, ya que de aquí parte el tener una sobre corrección o subcorrección por NMO, lo cual se vería por qué la curva estaría más arriba o más abajo de la horizontal a la que se quiere llevar.

**Aplicación de la corrección por NMO:** En este nuevo orden, todas las trazas pertenecientes a un mismo punto reflector cuentan con las mismas características reflectivas y por tanto, pueden sumarse para obtener una traza resultante (traza CMP) que posee mejor relación señal/ruido. Tal es el objeto de la ordenación en conjuntos CMP. Pero para ello, antes del apilamiento (o suma de las trazas CMP) la trayectoria hiperbólica de los eventos de reflexión debe ser transformada, en el eje del tiempo, en una línea horizontal (paso a *offset* cero) de manera que todas las trazas al ser sumadas estarán en fase. A este paso se le conoce como corrección NMO (*Normal MoveOut*) y la forma de conseguir dicha alineación es mediante la asignación de la velocidad de la trayectoria de reflexión.

**Apilado de datos:** Una vez haciendo el análisis de velocidad, con los resultados obtenidos y una vez aplicadas las correcciones NMO se procede, mediante la suma, a obtener la sección sísmica. Así pues, una sección sísmica está formada por todas las trazas CMP y representa una imagen de los reflectores presentes en el subsuelo a *offset* cero y modo tiempo doble. Cabe mencionar que esta sección en este proyecto es la presentación final, ya que recordemos que el procesamiento que se le está aplicando es un procesamiento preliminar de campo.

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

**Procesamiento post- apilamiento:** En este proceso se aplica la deconvolución, con el objetivo de comprimir la ondulada para mejorar la resolución vertical, así como también 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.

### 4.3 Generación de Sismogramas Sintético

Se genero un sismograma sintético con los datos que se midieron en el laboratorio de los núcleos del pozo Yax-1. El Software que utilice para generarlo es Matlab, ya que es un programa bastante flexible para la solución de estos problemas.

#### Flujo de trabajo

El primer paso que de realizo fué el calculo de la reflectividad, esto se hizo con la fórmula del coeficiente de reflexión (Ec. 3.5), el resultado obtenido se muestra en la fig. 4.2, donde se muestra el grafico de lado izquierdo de la reflectividad contra la profundidad.

Como segundo paso, se hizo la conversión de los datos en profundidad a tiempo, para ello se uso el promedio obtenido de la velocidad de 3.569 [m/s], y se mantuvo constante para la conversión. La formula usada es:

$$V = \frac{z}{t} \dots \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:  $V=3.569$ [m/s];

z: Profundidad correspondiente a cada muestra

t: tiempo

De la ecuación 4.1 se despejo el tiempo (t), quedando:

$$t = \frac{z}{v} \dots \text{Ecuación 4.2}$$

Como tercer paso, se programó en matlab la ondícula de Ricker de fase cero con una frecuencia de 25 Hz (se muestra en la fig. 4.3). Una vez obtenidos todos los cálculos, se hizo la convolución de la ondícula de Ricker con la serie de reflectividad, utilizando la ecuación 3.3.3.6, el resultado fue el sismograma sintético (se muestra en la fig. 4.4).

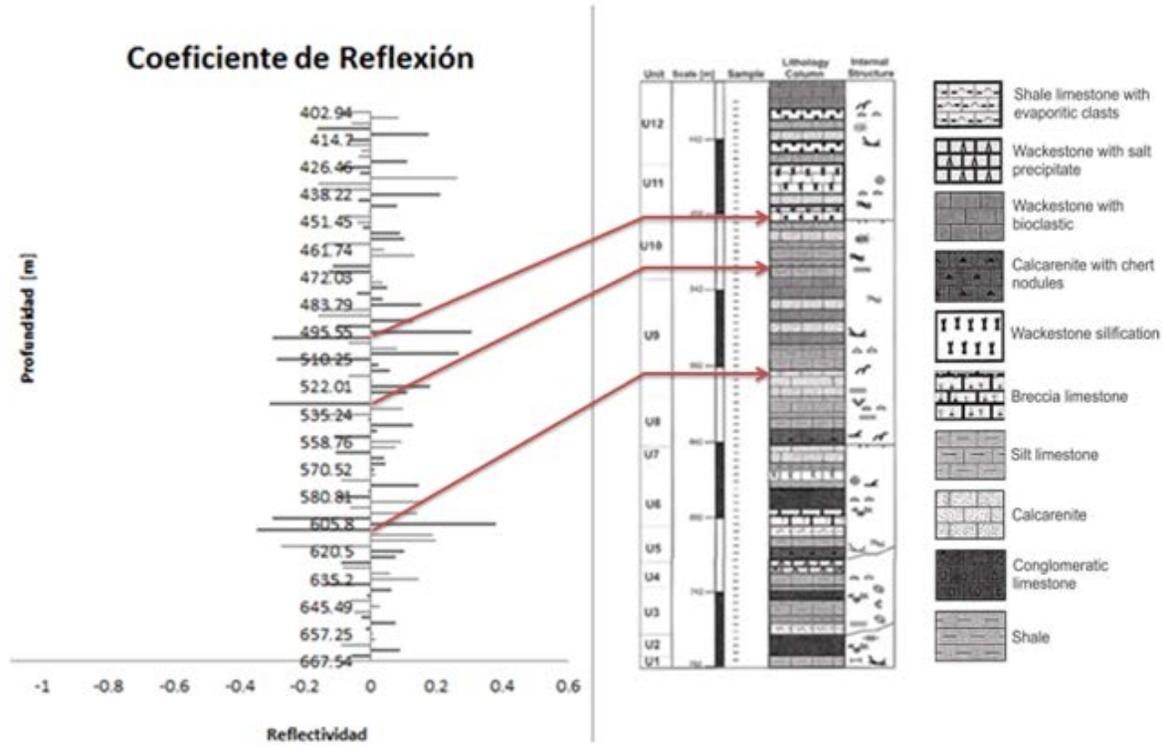


Fig. 4.2 Serie de reflectividad correlación con la columna litológica.

Aquí se muestra el resultado del cálculo de la reflectividad de los datos medidos en el laboratorio del pozo Yax.-1, en el eje vertical, se observa que la reflectividad va de -0.38 a 0.40, así mismo también observamos el cambio de polaridad. Se observa que la correlación de la serie de reflectividad con la columna litológica tiene una gran similitud, los picos de reflectividad que se marcan en la serie de reflectividad a los 495 [m] de profundidad con una reflectividad de 0.4, con polaridad positiva y negativa, muestran un cambio de litología de la unidad 11 a la unidad 10, las cuales corresponden a caliza tipo wackstone a caliza limosa. El siguiente pico de reflectividad que resalta es a los 530[m] de profundidad con una reflectividad de 0.4 con polaridad negativa, la cual corresponde a un cambio litológico de calcarenita a caliza limosa. El ultimo pico que resalta, se encuentra a 605 [m] de

profundidad con una reflectividad de 0.4 con polaridad positiva y negativa, ésta marca un cambio litológico entre la unidad 9 y 8, de caliza limosa a caliza wackstone.

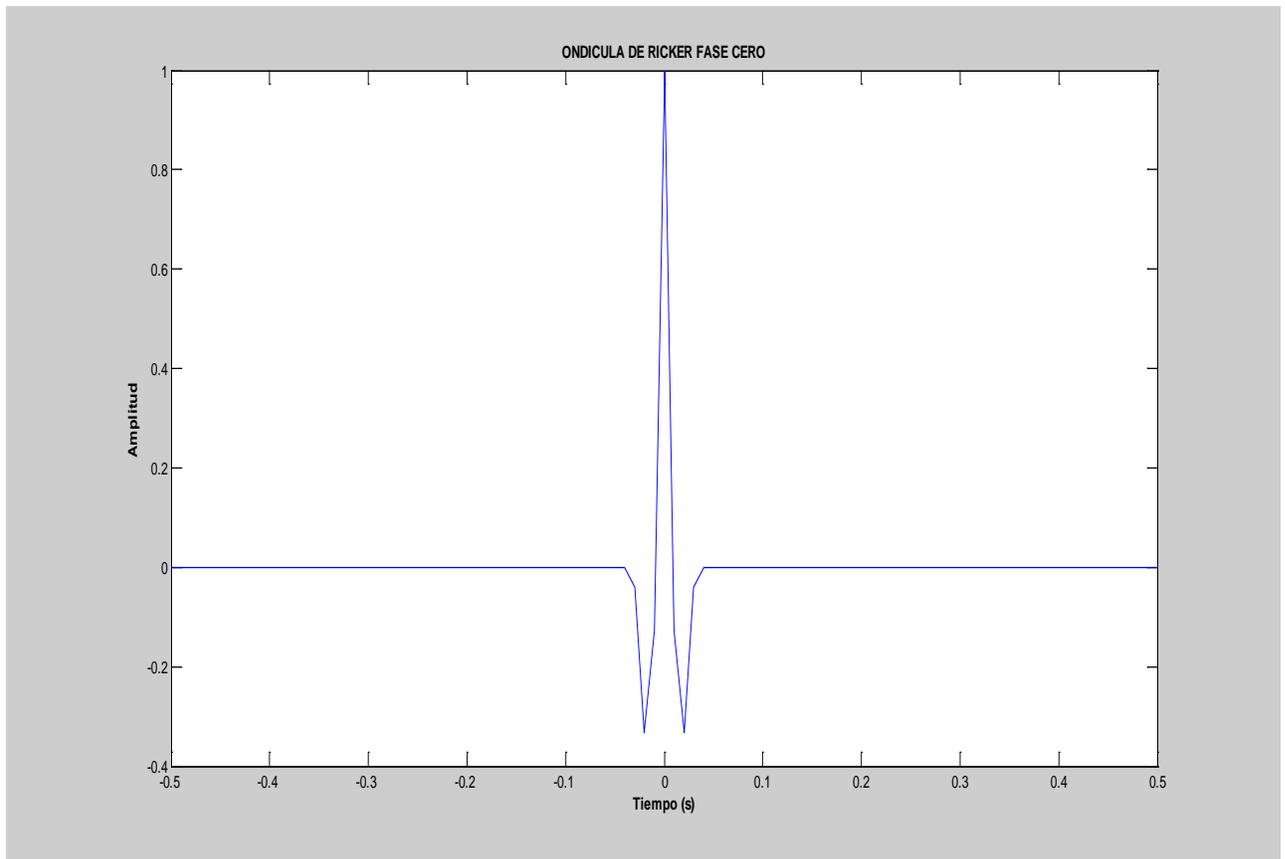


Fig.4.3. Muestra la ondícula de Ricker de fase cero, con una frecuencia de 25 Hz.

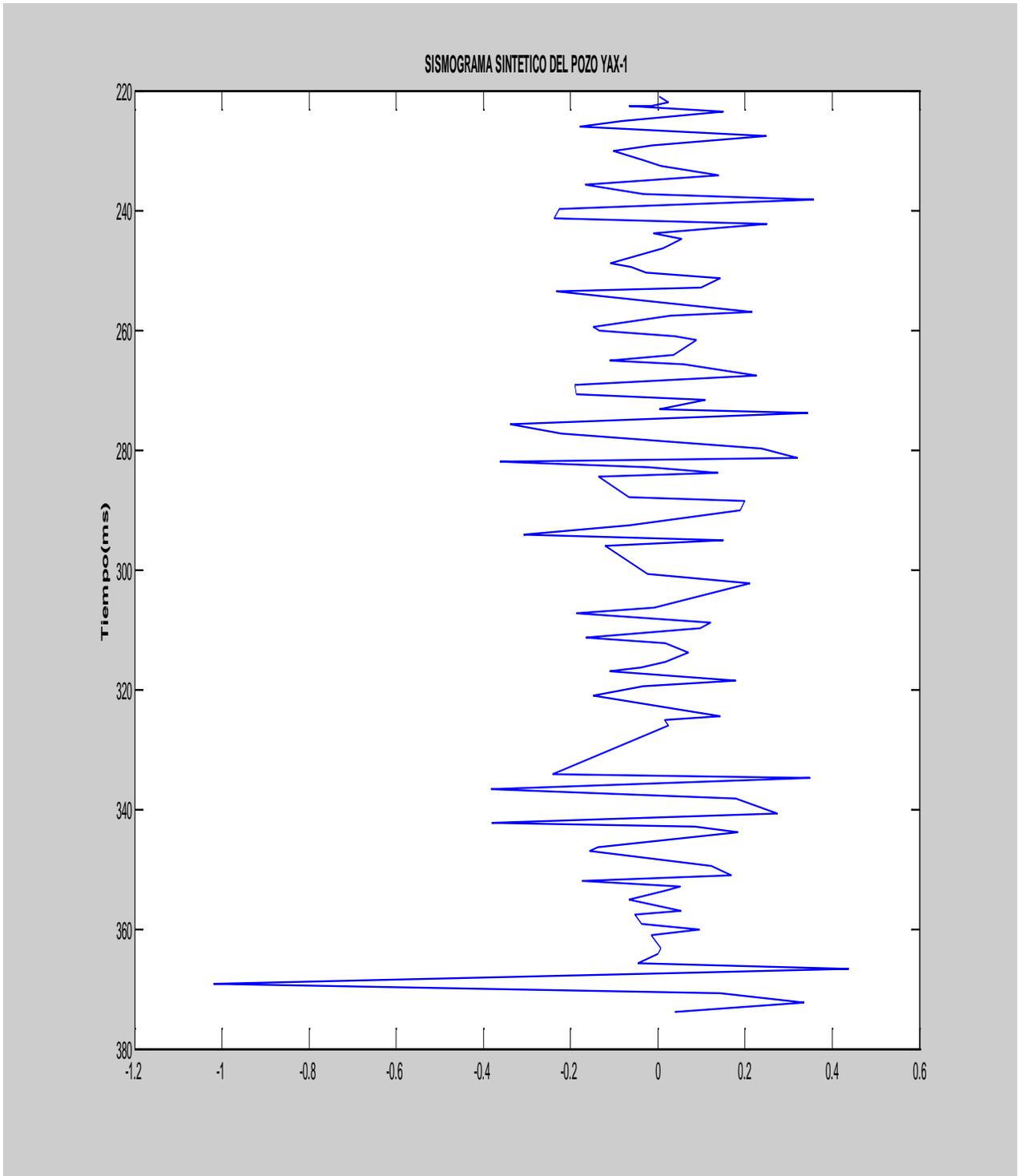


Fig. 4.4 En esta figura muestra el sismograma sintético obtenido.

#### 4.4 Utilizando Petrel. Atributos Sísmicos

El cálculo de atributos es un proceso geofísico de la señal en donde el software permite realizar el cálculo del atributo al volumen sísmico, a ventanas en tiempo o a superficies previamente generadas según sea el objetivo a estudiar. Petrel cuenta con una amplia gama de atributos los cuales se agrupan en 5 clases:

- Atributos de procesamiento de señal "signalprocessing"
- Atributos complejos "Complejos Atributes"
- Métodos estructurales "StratigraphicMethods"
- Métodos estructurales "StructuralMethods"
- Métodos de conversión a profundidad "DepthConversionMethods"

Los atributos que se aplicaron para estos datos son, los atributos de procesamiento de señal. Entre ellos: Atributo instantáneo de envolvente de amplitud, Atributo instantáneo de fase y Atributo instantáneo de frecuencia.

## CAPITULO 5. INTERPRETACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos después del procesamiento. Se mostrara la correlación del sismograma sintético, y el resultado de la aplicación de atributos sísmicos a las imágenes sísmicas.

### **5.1 Correlación del Sismograma Sintético**

El estudio de sismogramas sintéticos en conjunto con otras herramientas de pozo permite determinar las relaciones existentes entre la lito-estratigrafía de un sondeo y la respuesta sísmica que ella genera, hasta el punto de poder establecer dentro de una traza sintética el origen y significado geológico de las reflexiones que la constituyen.

Para el presente trabajo se dispone de datos obtenidos del laboratorio la realizar la medición de densidad y  $V_p$  de los núcleos obtenidos del pozo Yax-1. Como se sabe, la unión de la densidad con la  $V_p$  (velocidad de onda P), mediante la Ecuación 3.5, da el llamado coeficiente de Reflexión ( $R_c$ , que dan la relación de amplitudes entre dos medios sobre los que incide un rayo perpendicular).

Ahora bien como se sabe el producto de la velocidad de propagación de un medio por la densidad del mismo, es lo que se denomina impedancia acústica.

Estos coeficientes ( $R_c$ ) se pueden calcular a partir de dos digrafías de pozo sónico y densidad, que tras ser asociados a una ondícula (convolución), se transforman en valores de amplitud, que definirán la traza sísmica.

## 5.1 Empalme de Sismograma Sintético con Sección Sísmica Chicx A

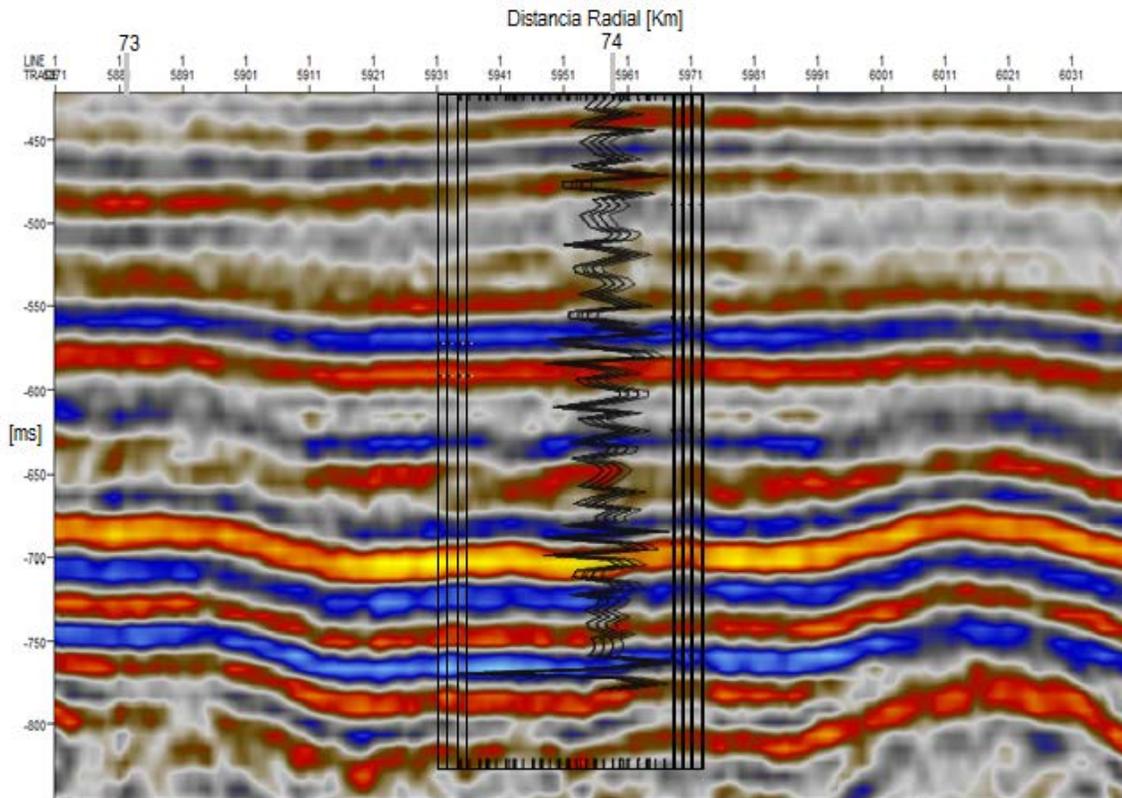


Fig. 5.1 Empalme de sismograma sintético con la sección sísmica Chicx A.

Para realizar el empalme del sismograma sintético obtenido anteriormente con la sección sísmica Chicx A, se tomaron en cuenta varios detalles, y se explica por qué con la sección Chicx A. La sección Chicx A toca una parte del cráter de impacto, nosotros sabemos que los datos con los cuales se generó el sismograma pertenecen al pozo Yax-1, también se sitúa en una parte del cráter de impacto (como se observa en la fig.2.5), esa es una de las primeras razones por las cuales se eligió la sección Chicx A. Posteriormente para situar el sismograma en la sección, se decidió usar el siguiente criterio, guiarse por los reflectores más energéticos, para poder amarrar el sismograma a uno de ellos y de ahí partir, sin olvidar que este se buscó en la parte del cráter con la secuencia carbonatada terciaria, por la razón antes dicha.

Como podemos observar el sismograma generado con las mediciones de laboratorio tiene un buen empalme con la sección sísmica, podemos notar, que los contrastes de impedancia bruscos se encuentran bastante empalmados con el sismograma, entre los 550 y 600 [ms], se identificaron dos reflectores bastante energéticos, los cuales en el sismograma son dos picos que sobresalen, así mismo entre los 650 y 700 [ms] se encontró otro reflector bastante energético, correspondiente nuevamente a dos picos que sobresalen en el sismograma.

Ahora para tener un mejor amarre de lo antes dicho, se procedió a realizar la correlación con otra línea regional, que de igual manera toca una parte del cráter de impacto, la línea Chicx C, en la cual se ubicó la distancia radial del cráter a la que empalme el sismograma con la sección Chicx A, y el tiempo en [ms], para lo cual, los resultados se aprecian en la siguiente Fig. 5.1.2.

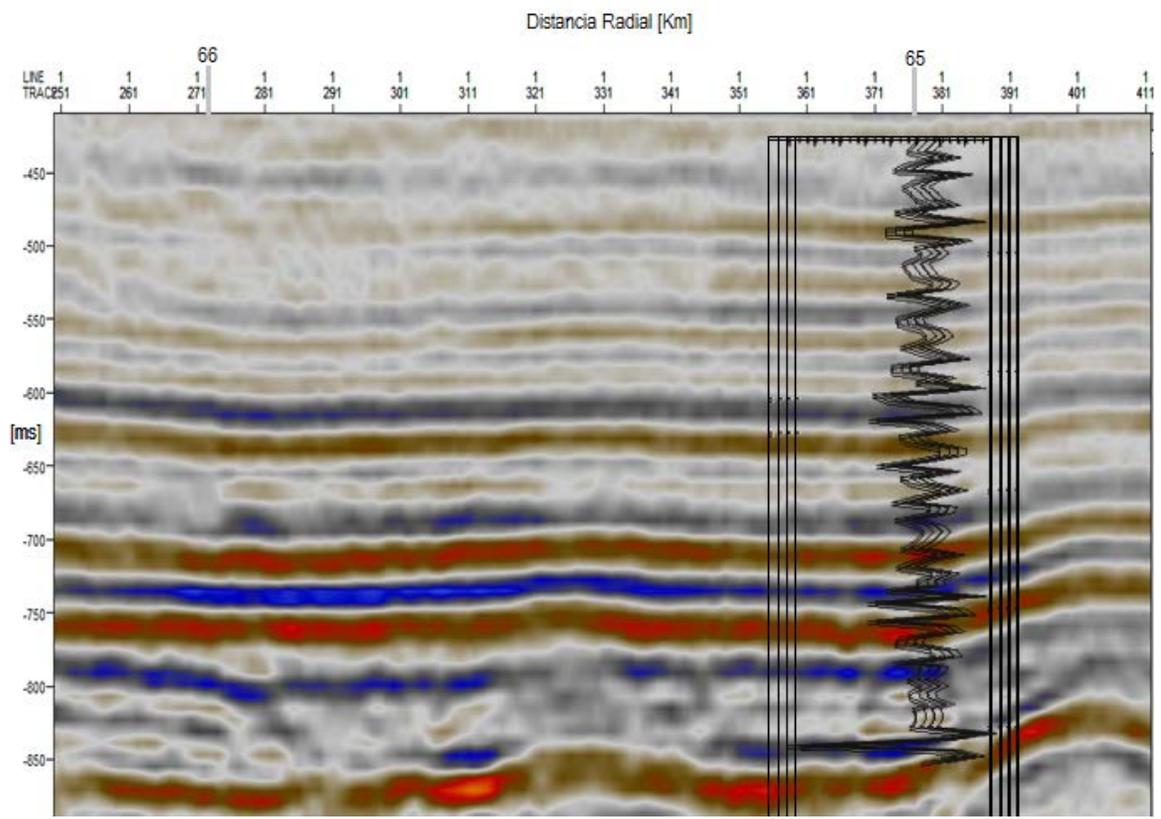


Fig. 5.2 Empalme de sismograma sintético con la sección sísmica Chicx C.

Tomando en cuenta la ubicación de esta línea y la dirección invertida con respecto a la sección Chicx A del centro del cráter, ubique la distancia radial antes usada y así ubique el sismograma en la

sección Chicx A, así como también el tiempo [ms]. Los resultados que se observan, son bastantes congruentes con los de la sección Chicx A; algo que es importante tener en cuenta, es el nivel de fracturamiento y problemas estructurales que están presentes en los dos diferentes puntos del cráter que estamos estudiando; como se observa, los reflectores no se notan con la misma reflectividad que en la sección Chicx C, esto se asocio a que debido a que de acuerdo al grado de fracturamiento, la energía se disipa a diferente grado, así como también la mezcla de los diferentes materiales rocosos varían de un lugar a otro, por el grado de impacto del meteorito.

## 5.2 Interpretación con Atributos Sísmicos

### 5.2.1 LINEA CHICX C

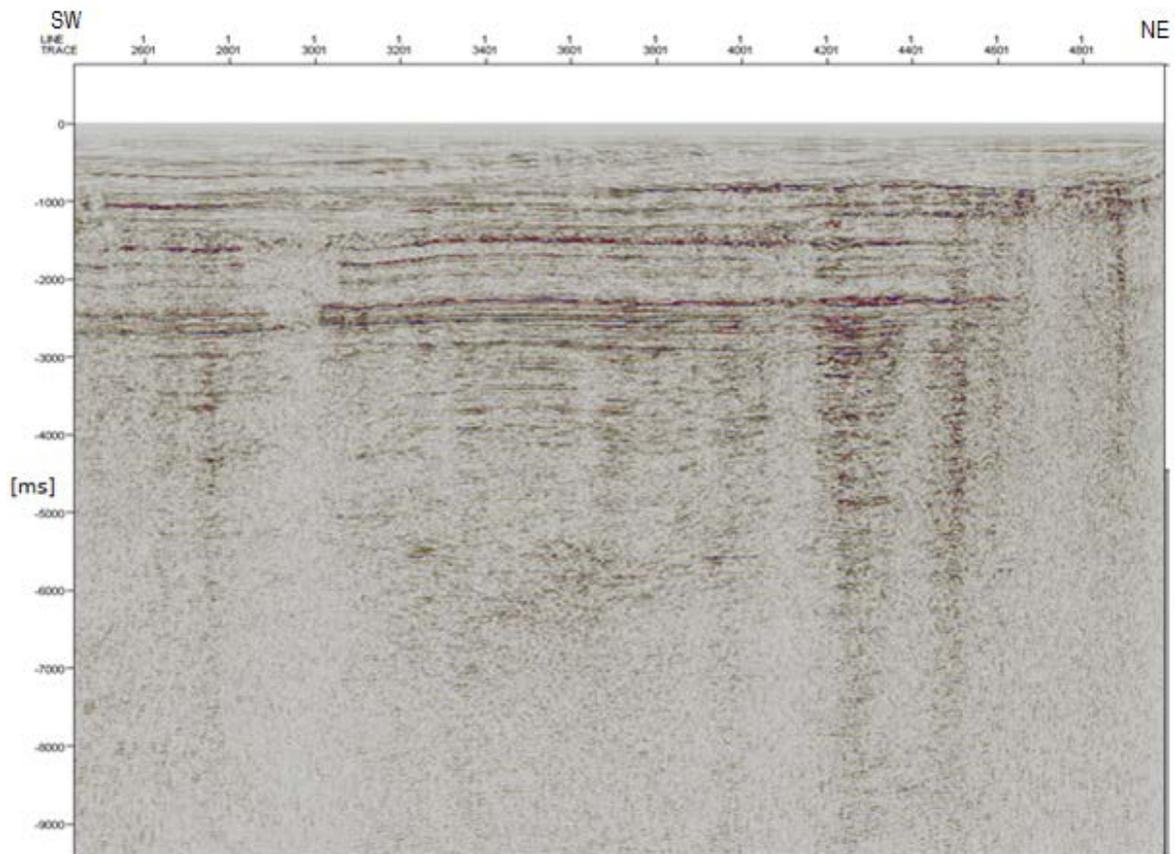


Fig.5.3 Línea sísmica Chicx C.

En esta figura muestro la sección sísmica procesada, sin aplicar ningún atributo sísmico. En el eje vertical se indica el eje del tiempo (ms), y en el horizontal el número de línea y traza. Como se puede observar esta sección sísmica se analizara de la traza 2601 a la 4801; este intervalo se

seleccionó con base en la resolución, a primera vista, de la imagen sísmica para poder observar mejor la ayuda de los atributos sísmicos.

Como se aprecia en esta imagen sísmica, los horizontes no son tan claros; se observan 3 eventos energéticos que podrían delimitar diferentes paquetes; el primero se ubica a los 1000 [ms], el segundo reflector alrededor de los 1600 [ms], y el tercero a los 2500 [ms]; así mismo, también se observa que los estratos no tienen una clara continuidad lateral.

Línea con StructuralSmoothing.

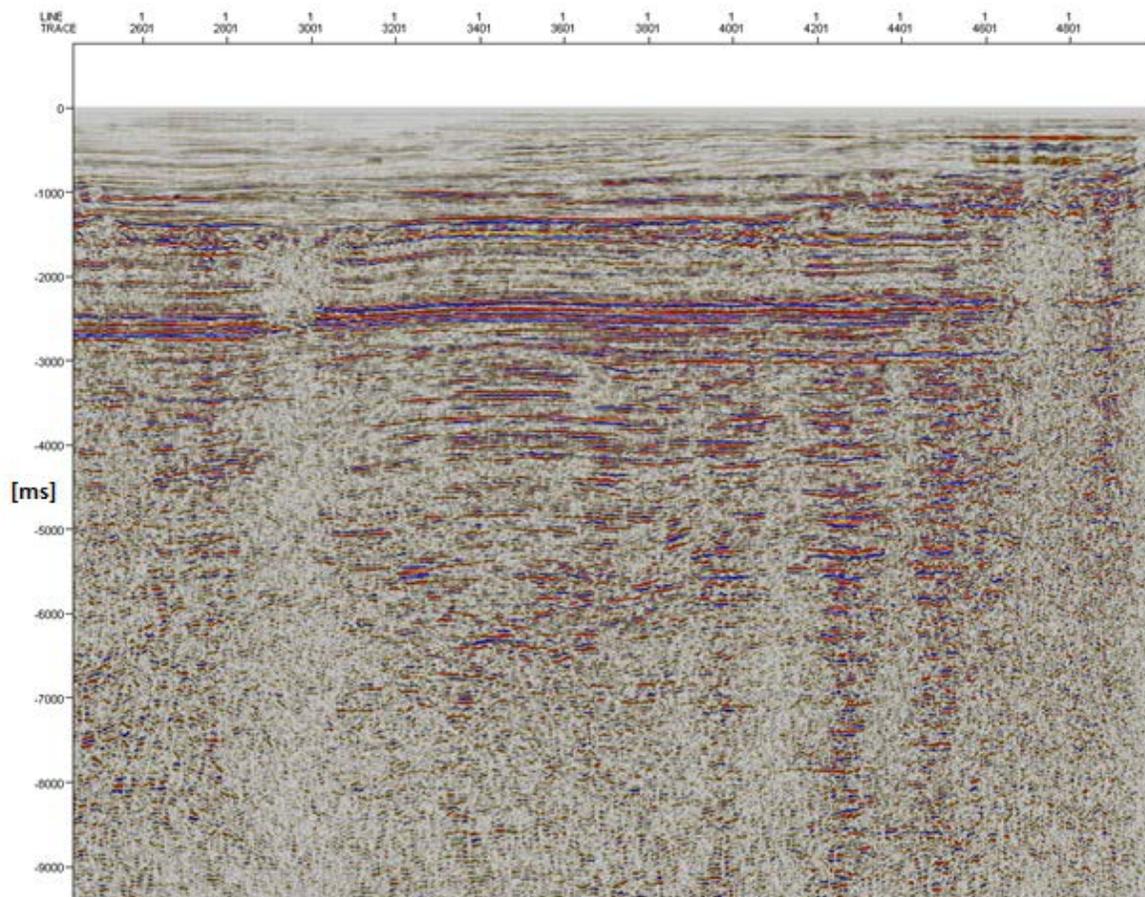


Fig. 5.4 Sección sísmica Chicx C. StructuralSmoothing.

En esta figura se muestra la sección sísmica después de aplicar un suavizado de 1.5, con el cual, se filtran las altas frecuencias y disminuye la resolución de la imagen. Se observa que la definición de los eventos mejora, así como también, que la mayoría de los eventos carecen de una continuidad lateral.

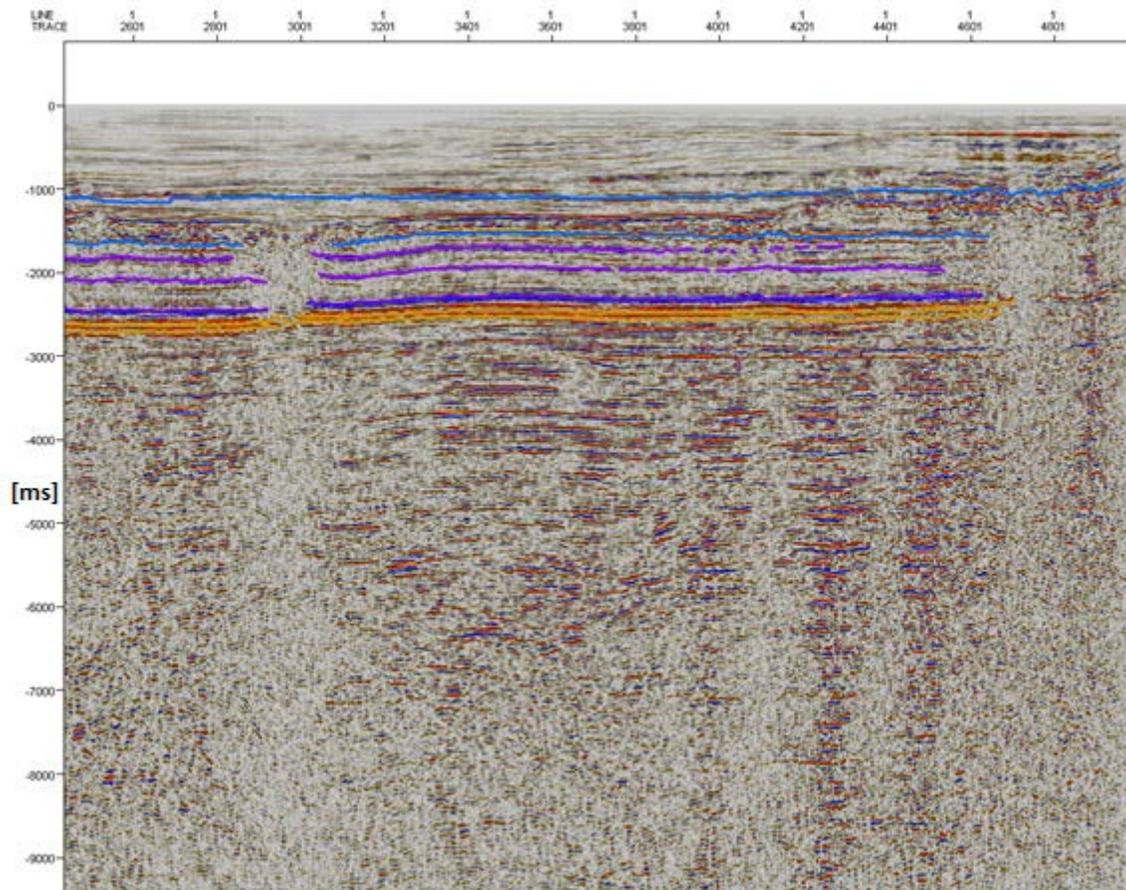


Fig. 5.2.3 Diagrama de línea

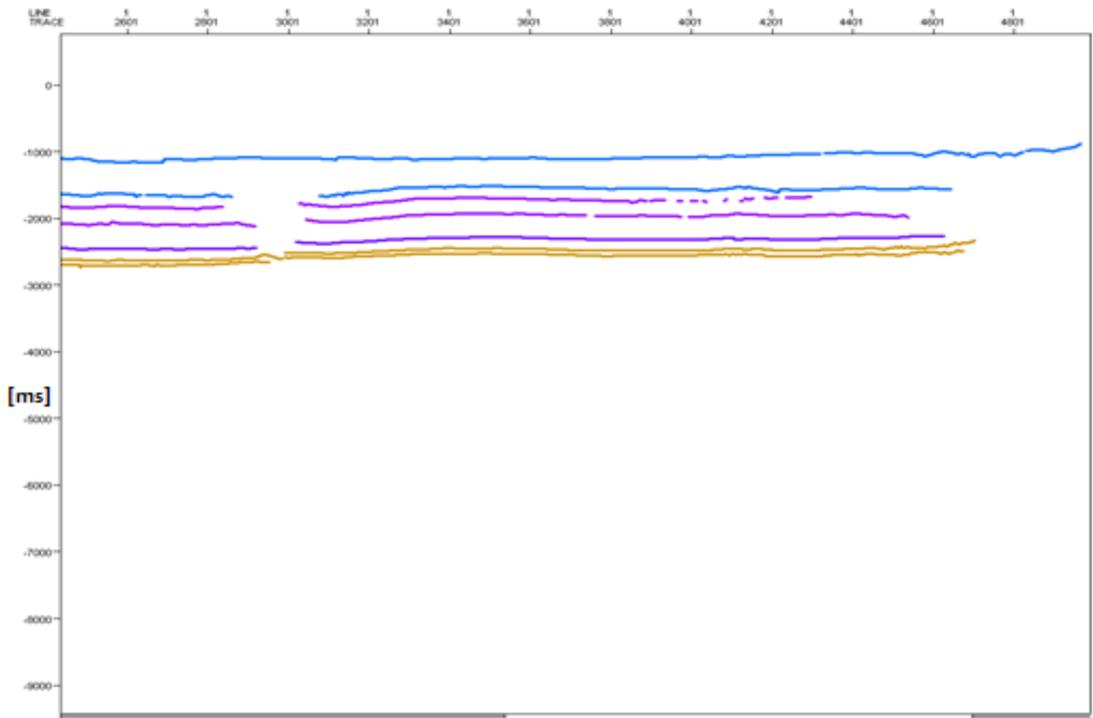


Fig. 5.5 Diagrama de línea

Con esta imagen se definen mejor los 3 paquetes antes mencionados, junto con algunos estratos pertenecientes a cada horizonte: H1 (horizonte 1, marcado en color azul), H2 (horizonte 2 marcado en color morado) y H3 (horizonte 3, marcado en color café)

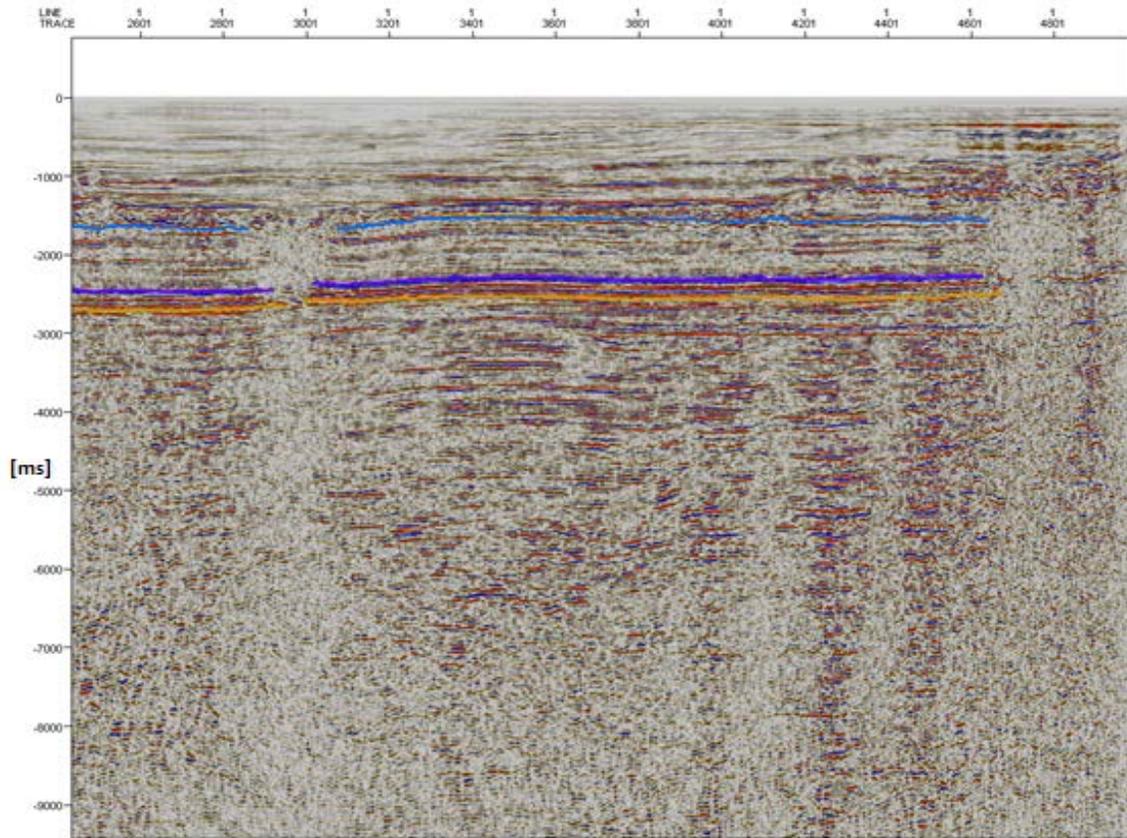


Fig. 5.6 Sección sísmica Chicx C. Diagrama de línea

Aquí únicamente se marcan los tres horizontes antes ya definidos H1, H2 y H3. En el primer paquete limitado por la superficie y el horizonte H1 que va de los 0 a los 1600 [ms], se observa que los eventos cuentan con poca continuidad lateral, así como también se muestran zonas de baja energía, donde se pierde la continuidad de los eventos. En el segundo paquete delimitado por los horizontes H1 y H2, que va de los 1600[ms] a los 2600[ms], se observan los eventos con una continuidad lateral más constante que los del primer paquete; también se observan zonas de baja energía. El paquete limitado por los horizontes H2 y H3 empieza a los 2600 [ms]; en este horizonte están mejor definidos los eventos, con buena continuidad lateral.

## Envolvente de amplitud.

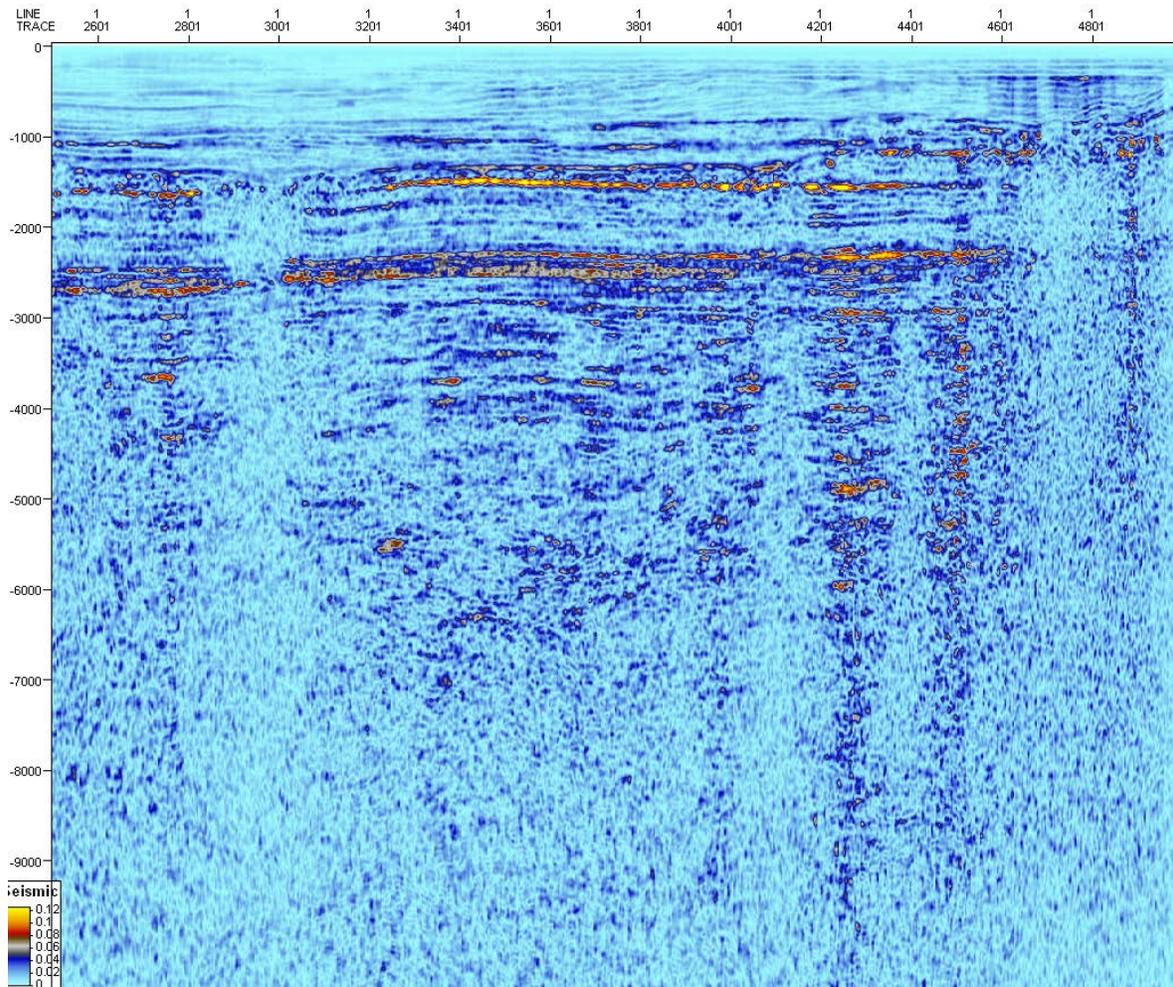


Fig. 5.7 Atributo de Envolvente de Amplitud. Este atributo nos muestra zonas de fallamiento, continuidad lateral y puntos brillantes.

Con este atributo se puede observar el contraste de impedancia que existe entre paquetes, esto debido al cambio litológico del subsuelo, así como a las diferentes propiedades petrofísicas del mismo.

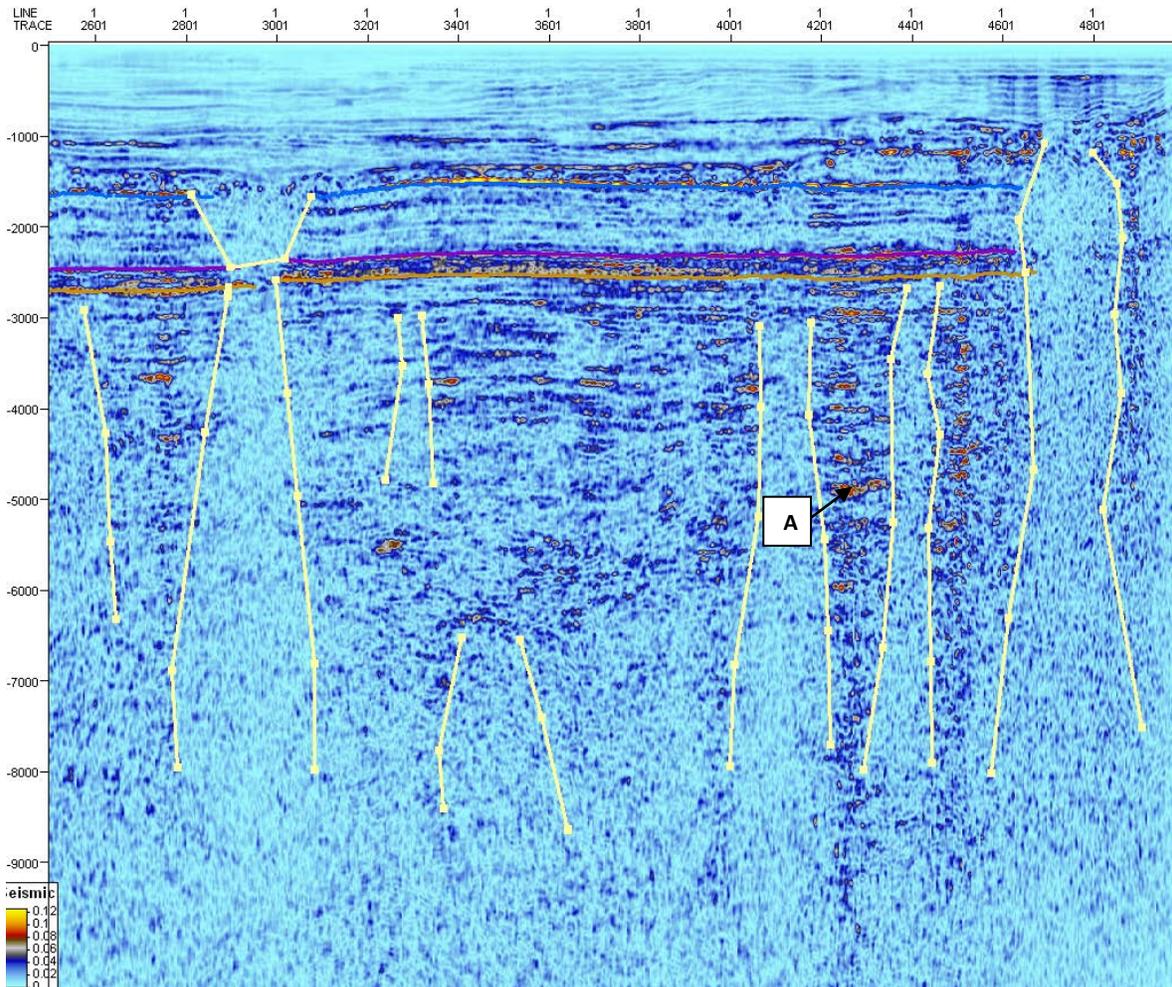


Fig. 5.8 Envoltura de Amplitud. Estructuras que se denotan en la Sección Sísmica Chicx C.

En esta sección se observan (la letra A) puntos brillantes con una amplitud alta, así como también se pueden delimitar zonas de baja energía (en color blanco); en el cual, se observa un contraste de impedancia bastante fuerte; estas zonas de bajas amplitudes podrían estar asociadas a domos salinos, cuando la onda sísmica se encuentra con bancos de sal, la energía se disipa; si fuera el caso, se podría afirmar que se debe esta atenuación de energía a lo antes dicho; pero en esta zona de estudio los domos salinos son improbables, ya que es una provincia de carbonatos, en donde no es común encontrar dichos domos. Así pues estas zonas de bajas amplitudes, se asocian a zonas fracturadas o de fallamiento; así como también se asocian a la irregularidad que existe en la textura los diferentes horizontes.

## Atributo de Frecuencia.

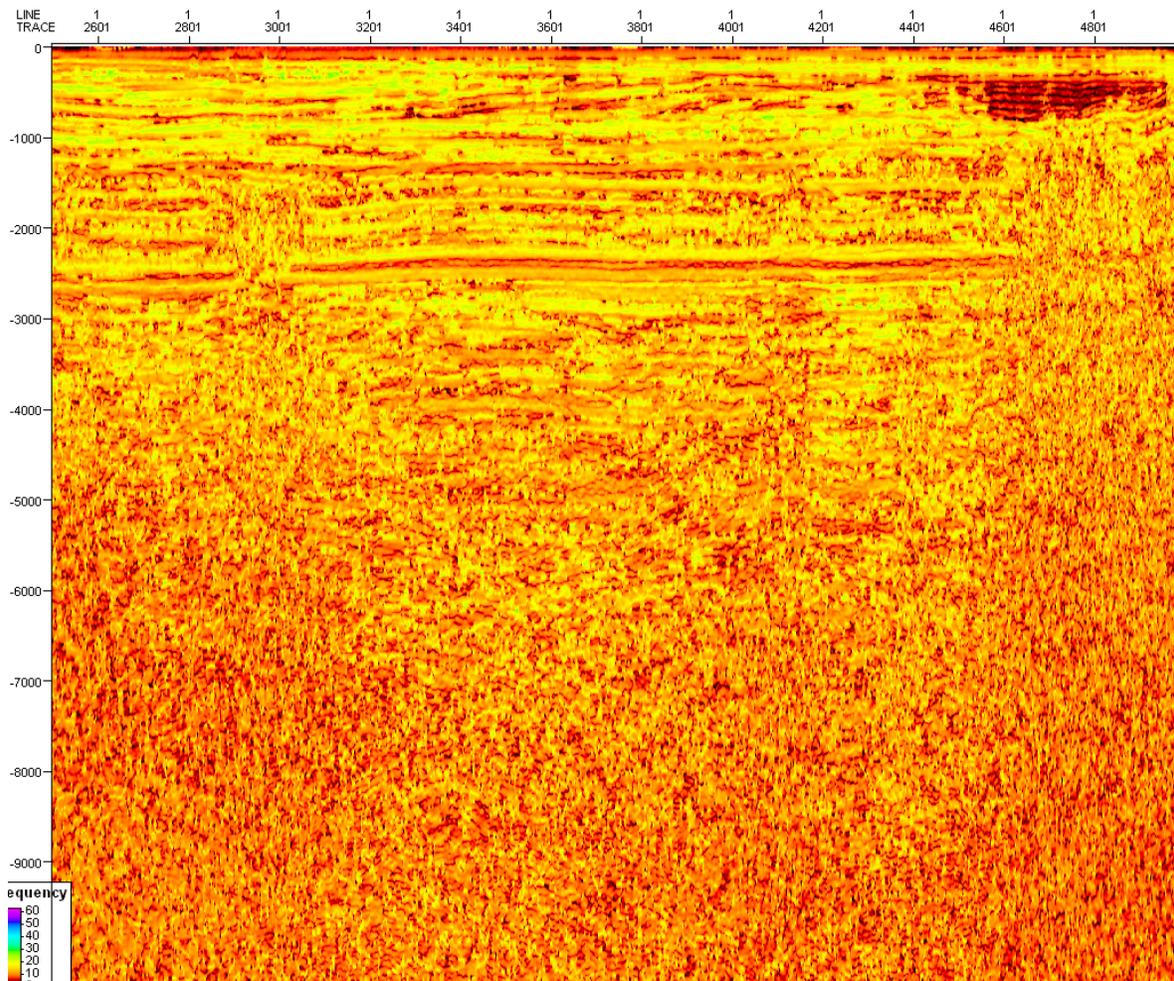


Fig. 5.9 Atributo de Frecuencia Instantánea. Este atributo es un indicador de fracturamiento asociado con bajas frecuencias en color oscuro.

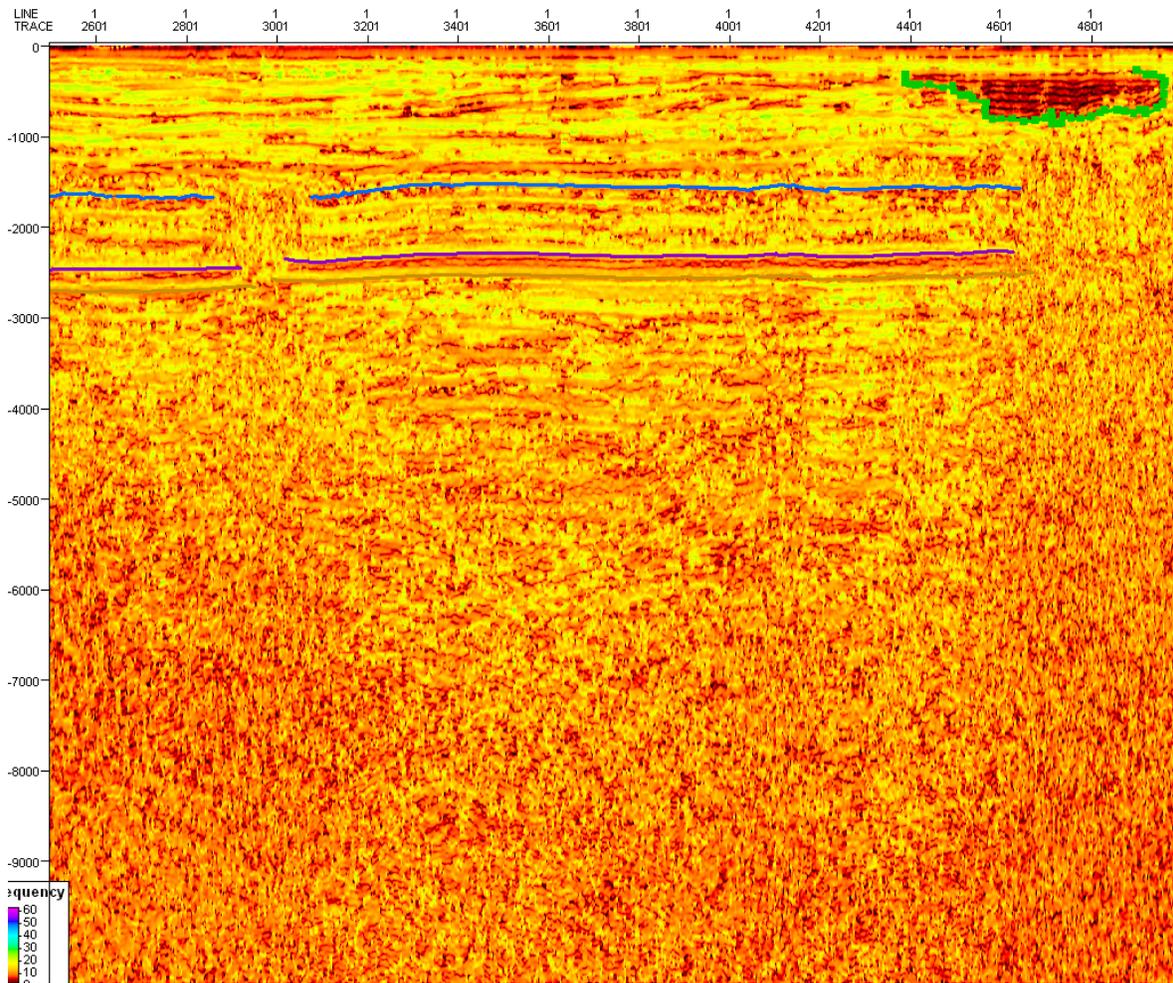


Fig. 5.10 Sección Sísmica Chicx C. Estructuras que se denotan con atributo de Frecuencia Instantánea.

Con este atributo se observa una estructura de baja frecuencia enmarcada en color verde, la cual si fuera esta la única herramienta para interpretar, se podría asociar esta estructura a un lente, que tal vez se pudo haber formado con material de relleno de alguna cavidad existente después del depósito de carbonatos; algo que es importante tomar en cuenta son las dimensiones que presenta dicha estructura, ya que se encuentra de los 4000 [ms] a los 5500 [ms], las dimensiones son de gran tamaño. En cambio las estructuras que se marcan con el atributo de Envoltorio de amplitud, que es un atributo ahora usado en las estructuras calcáreas, se aprecia que desaparecen, y además se observa una uniformidad en los estratos calcáreos, así pues, las estructuras antes marcadas en color blanco (fig. 5.8), son asociadas a zonas de fracturamiento, y fallamiento ya que se denotan en bajas frecuencias.

## Atributo de Frecuencia Instantánea.

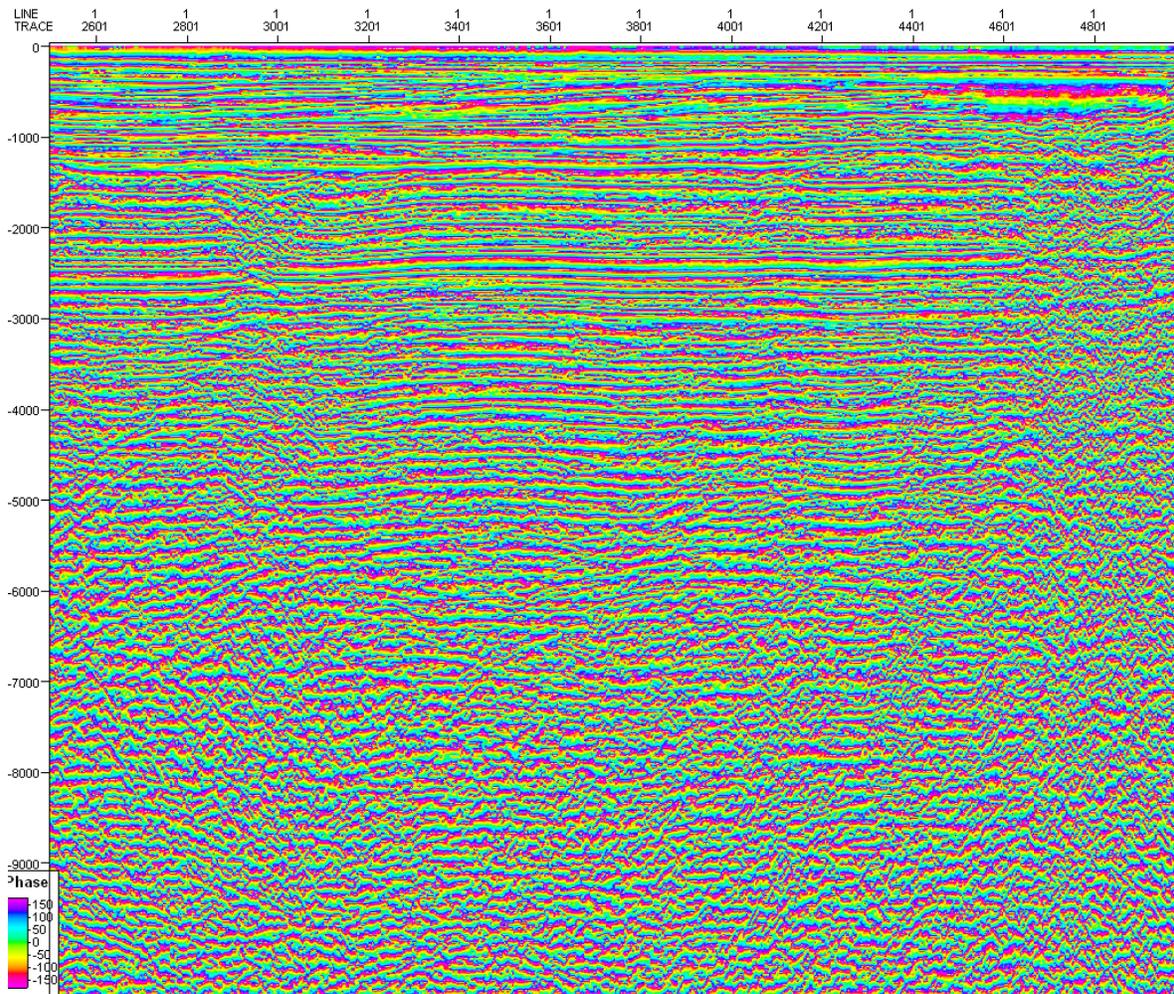


Fig. 5.11 Atributo de Fase Instantánea. Sección Sísmica Chicx C.

Este atributo muestra la continuidad lateral de los horizontes, y representa todos los eventos estratigráficos, lo cual ayuda a identificar diversas estructuras, así como también, a observar mejor la configuración de dicha estratificación.

## Atributo de fase Instantánea

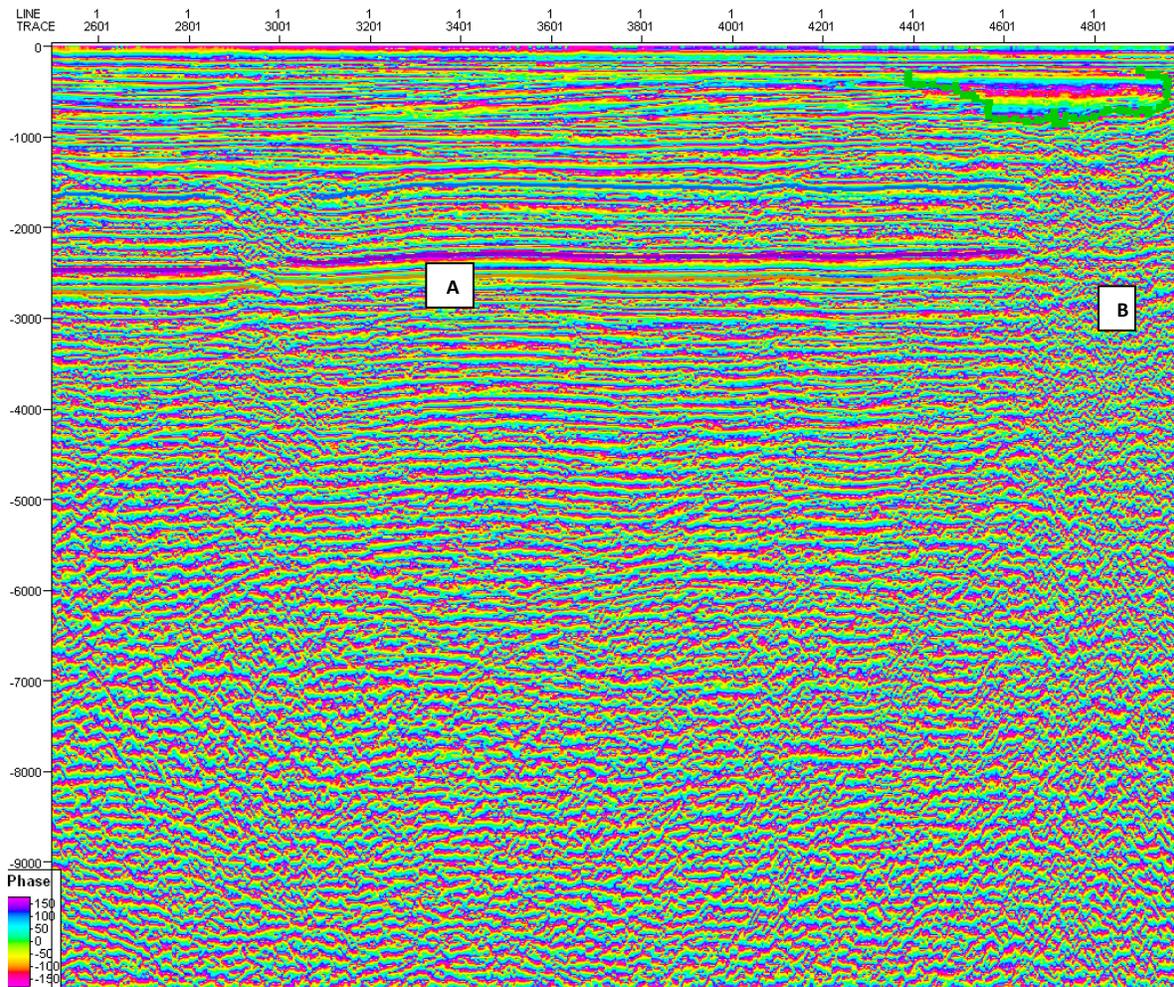


Fig. 5.12 Sección sísmica Chicx C. Continuidad lateral de los estratos.

En esta sección se observan, que los paquetes estratigráficos son continuos (señalado con la letra A), posteriormente la zona se vuelve caótica (señalado con la letra B); esto podemos asociarlo a fracturamiento. También se observa nuevamente la zona de bajas frecuencias (Fig. 5.10), la cual anteriormente se había asociado a un lente; pero con este atributo se observa que esta estructura es un acuñamiento que se puede asociar a la transgresión y regresión del mar, pues el estrato aparece con una continuidad lateral, el cual se va engrosando conforme avanza a la línea de costa.



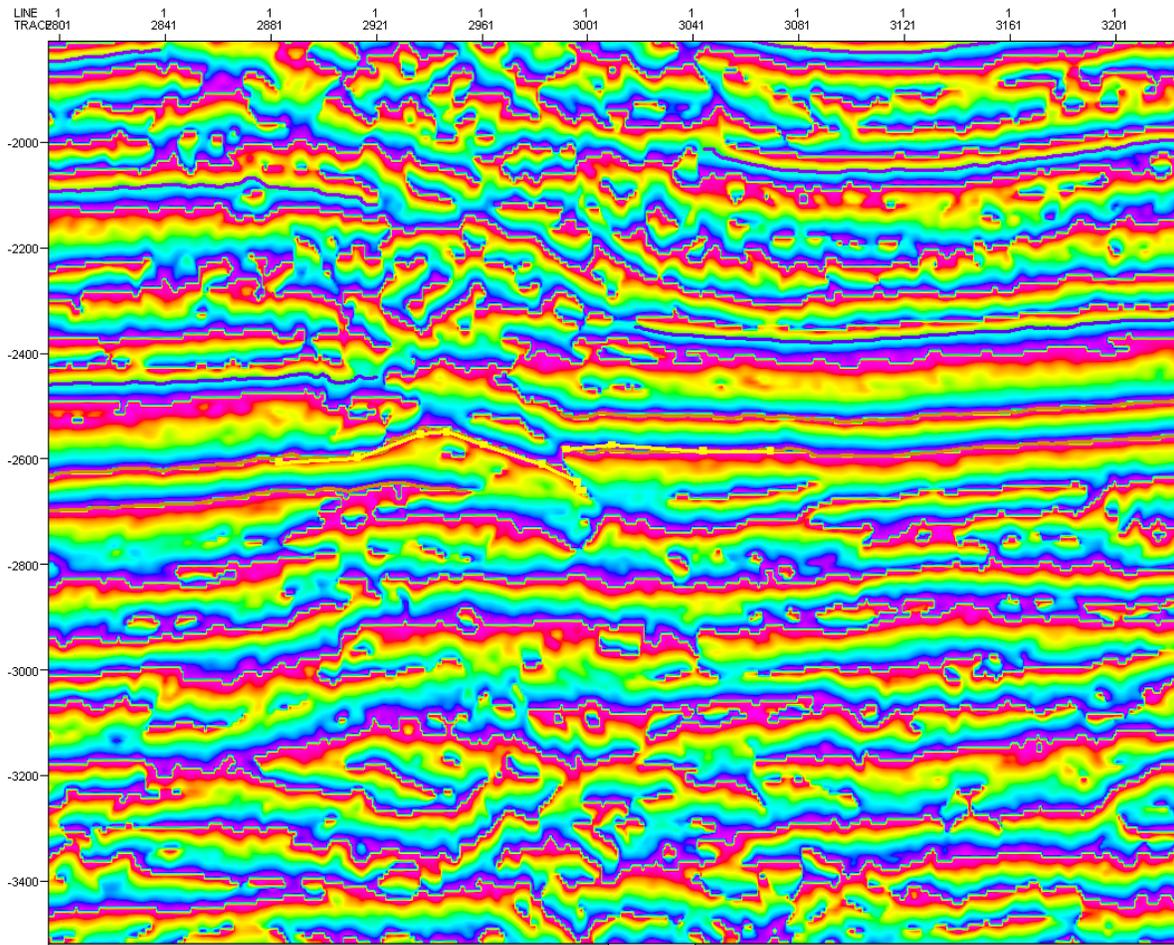


Fig. 5.14 Sección Sismica Chicx C. Identificación de Fallas

Aquí se presenta la falla (marcada en color amarillo de tipo inverso). Así como también se observar que la zona está bastante fracturada, y no hay continuidad lateral.

Acercamiento a zona de interés. Acuñaamiento lateral.



Fig. 5.15 Sección Sísmica Chicx C. Continuidad lateral de los estratos.

Con este atributo se visualizan detalladamente las configuraciones de estratificación. Se observa la continuidad lateral de algunos estratos (marcada en color azul), así como también la angulosidad de otros.

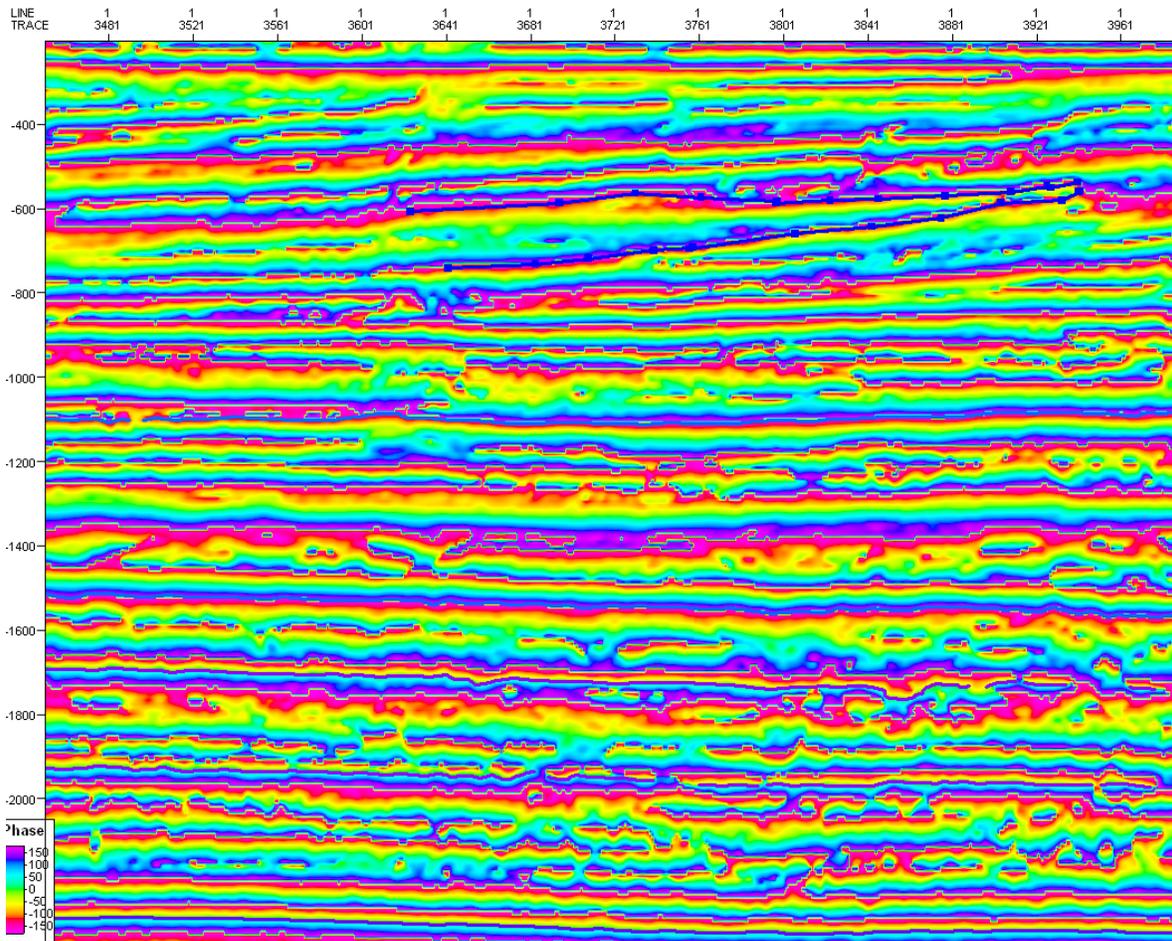


Fig. 5.16 Sección Sísmica Chicx C. Angulosidad de estratos.

Se presenta la angulosidad antes mencionada (en color azul), misma que se pueden asociar a las transgresiones y regresiones del mar.

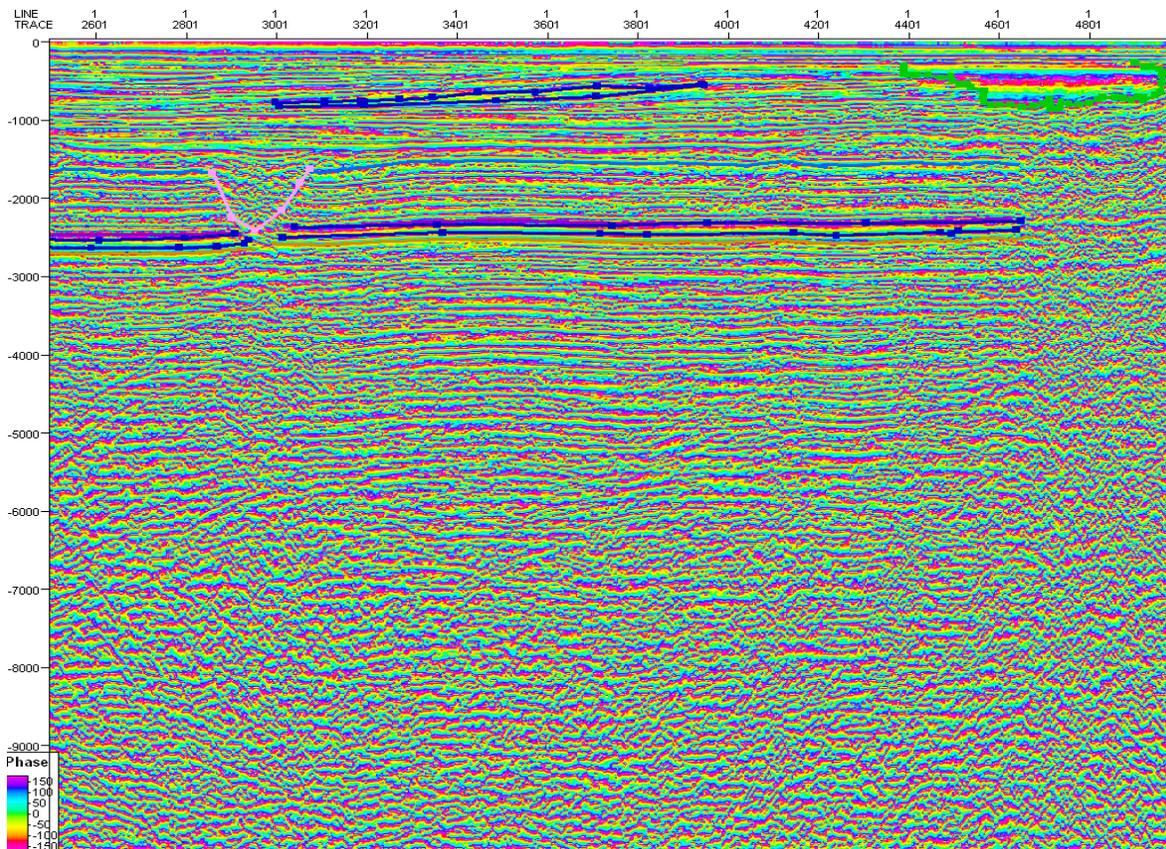


Fig. 5.17 Sección Sísmica Chicx C. Atributo de Fase Instantánea

Como producto final, se presenta un diagrama de línea donde se muestran todas las estructuras marcadas y analizadas anteriormente; así pues, también se señala (en color rosa) una zona caótica, la cual forma parte de las estructuras que se marcaron (en color amarillo) con el atributo de Envolvente de amplitud, como zona de bajas amplitudes; con este atributo, se definen mejor, y también se observa que la forma de la onda es contrastante al comportamiento de la onda que se propaga en el horizonte inferior, esto se asocia al efecto de bordes que se puede propiciar por alguna falla o fractura en esta sección.

## Diagrama de Línea final.

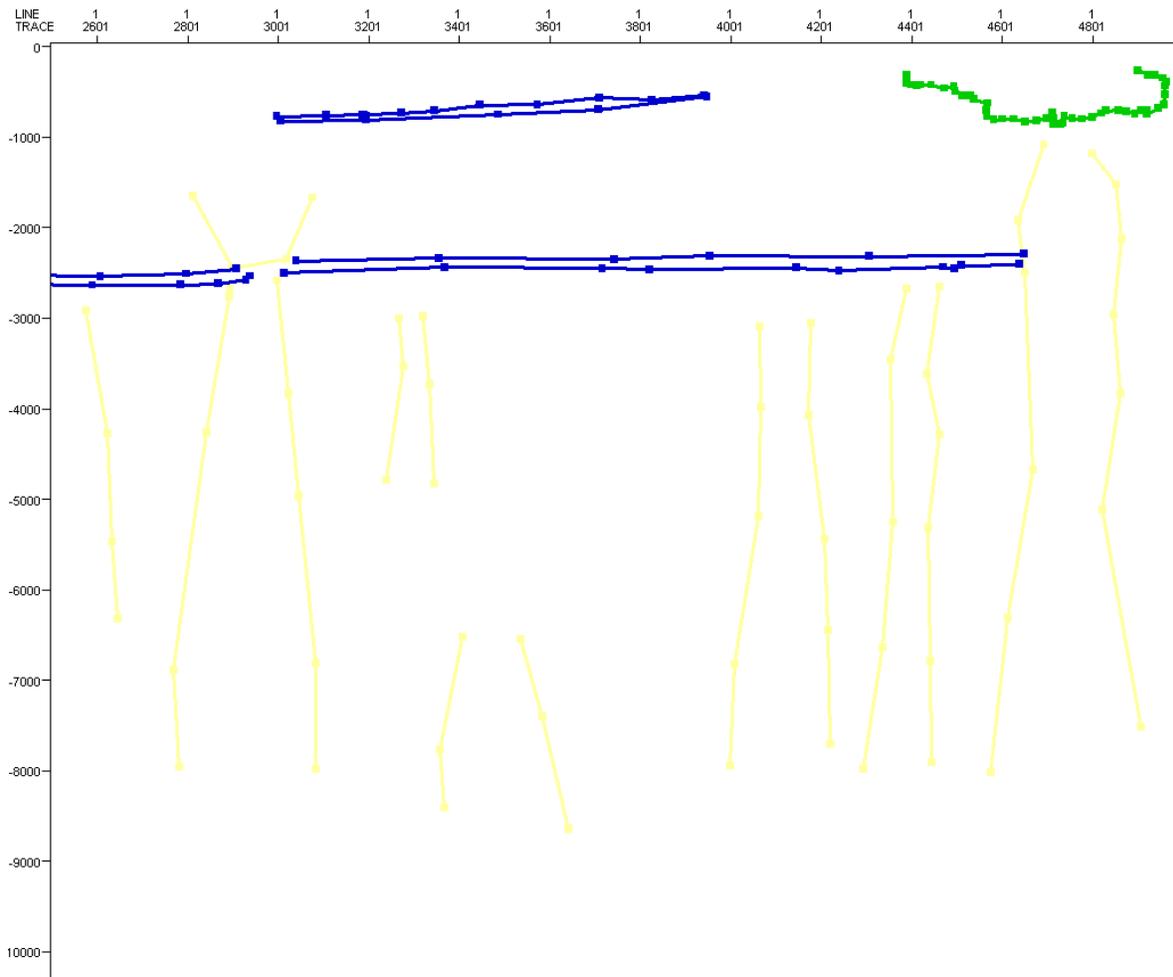


Fig. 5.18 Sección Sísmica Chicx C. Diagrama Final de Línea

En esta imagen se muestra el diagrama de línea que se obtuvo después de aplicar los atributos a la sección sísmica. Aquí los atributos sísmicos nos sirven para resaltar algunas características de la sección con las cuales se identifican nuevas estructuras y elementos más contundentes para dar una mejor interpretación.

## 5.2.2 LINEA CHICX A

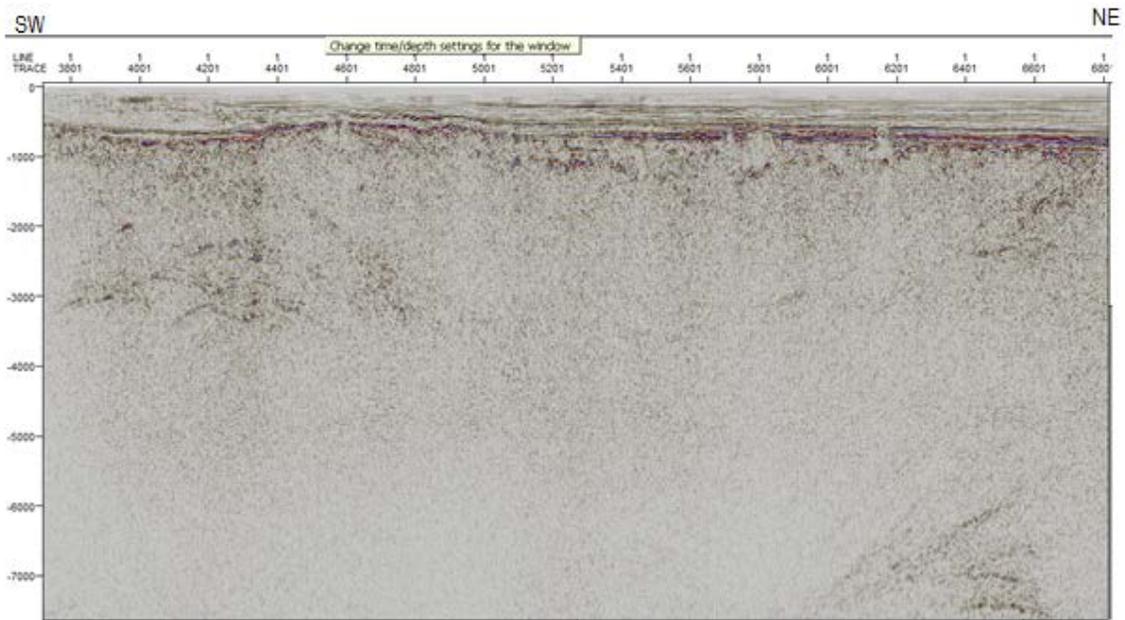


Fig.5.19 Sección Sísmica Chicx A.

Esta sección sísmica se analizó de la traza 3801 a la 6080, usando el criterio antes dicho en la línea C; debido a que a primera vista es la parte de la sección donde se observan mas estructuras. En el eje vertical se marca que el tiempo va de los 0 a los 7500 [ms].

Se observan 3 paquetes con diferentes contraste de impedancia, el primero A1, se ubica entre los 0 y 800 [ms]; el segundo horizonte A2, lo ubicamos de los 800 hacia los 5200[ms] y el ultimo A3, de los 5200 a los 7500 [ms]. También se destaca una zona de energía diferente (mayor) a la correspondiente a ese paquete, entre los 6000 y 7500 [ms], entre la traza 6001 y 6601.

## Línea A con structural smoothing

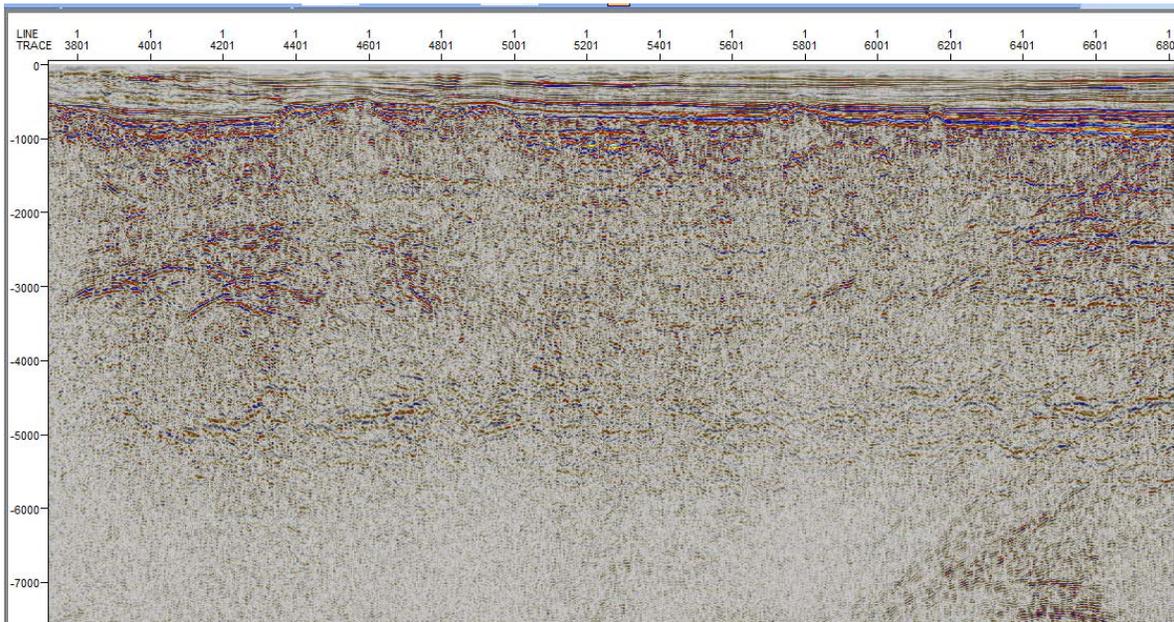


Fig. 5.20 Sección Sísmica Chicx A. StructuralSmoothing.

En esta imagen podemos observar nuevamente la sección sísmica después de haberle aplicado el structural smoothing, el cual funciona como filtro que impide el paso de altas frecuencias, para disminuir la resolución de la imagen.

Se delimitan mejor los 3 diferentes paquetes antes mencionados; el paquete A2 antes descrito data de los 800 a los 5200 [ms]; dentro de este paquete A2 se puede observar otro paquete con diferente reflectividad, el cual estaría describiendo otro tercer paquete A3, de los 3600 a los 5200 [ms], y el último A4, se define de los 5200 a los 7500 [ms], con una reflectividad notablemente más baja. Otra estructura que se observa con este filtro, se ubica de la traza 6001 a la 6601, entre los 2500 y 3500 [ms], por la curvatura que presentan, se podría interpretar que son pliegues antiforales; estos se reafirmarían con el atributo de fase instantánea.

El diagrama de línea correspondiente a esta sección, se define en la siguiente figura (Fig. 5.21)

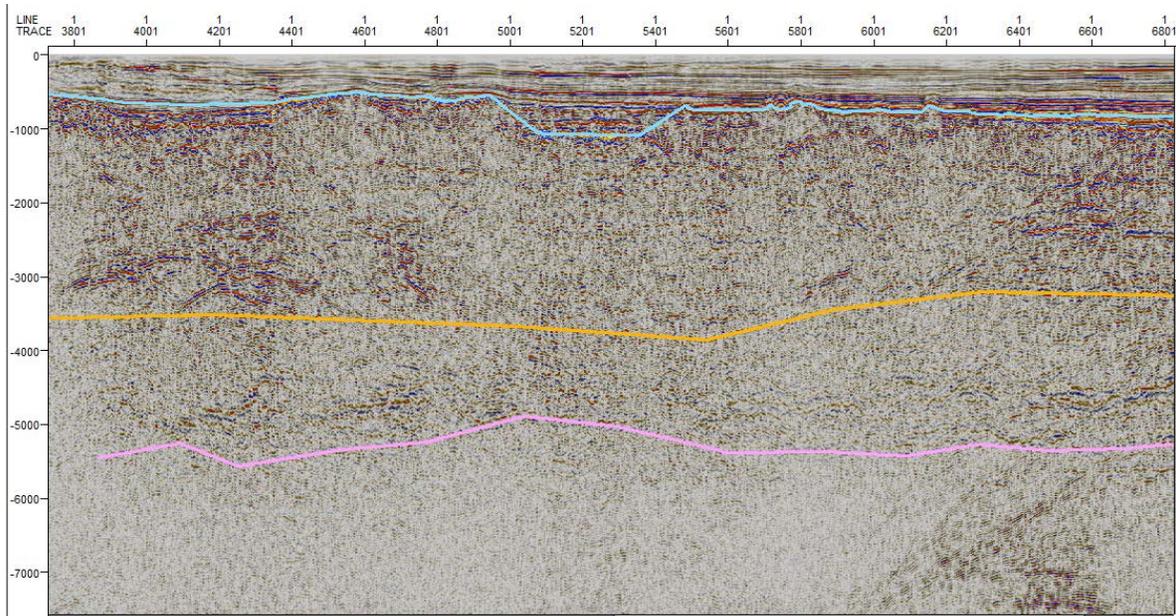


Fig. 5.21 Diagrama de línea de la sección Chicx A.

En este diagrama de línea se destacan los 3 paquetes antes descritos, paquete A1 (marcado en color azul), paquete A2 (marcado en color mostaza), paquete 3 (marcado en color rosa), y el paquete A4 que va de los 5200 a los 7500 [ms].

#### Atributo de Frecuencia Instantánea

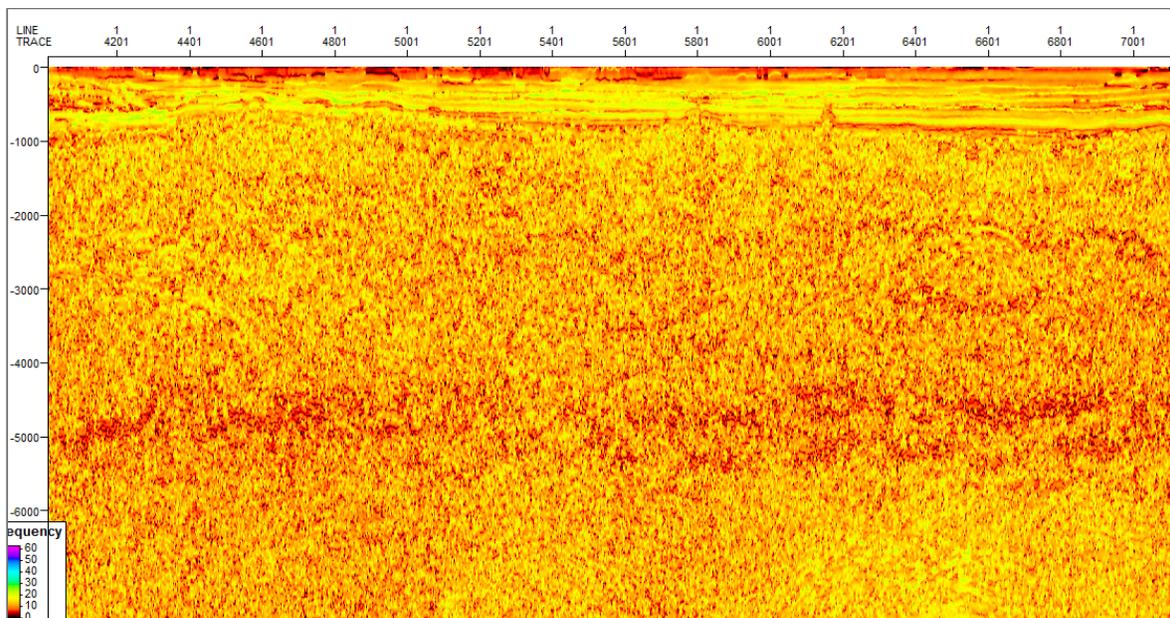


Fig.5.22 Atributo de Frecuencia Instantánea. Sección sísmica Chicx A.

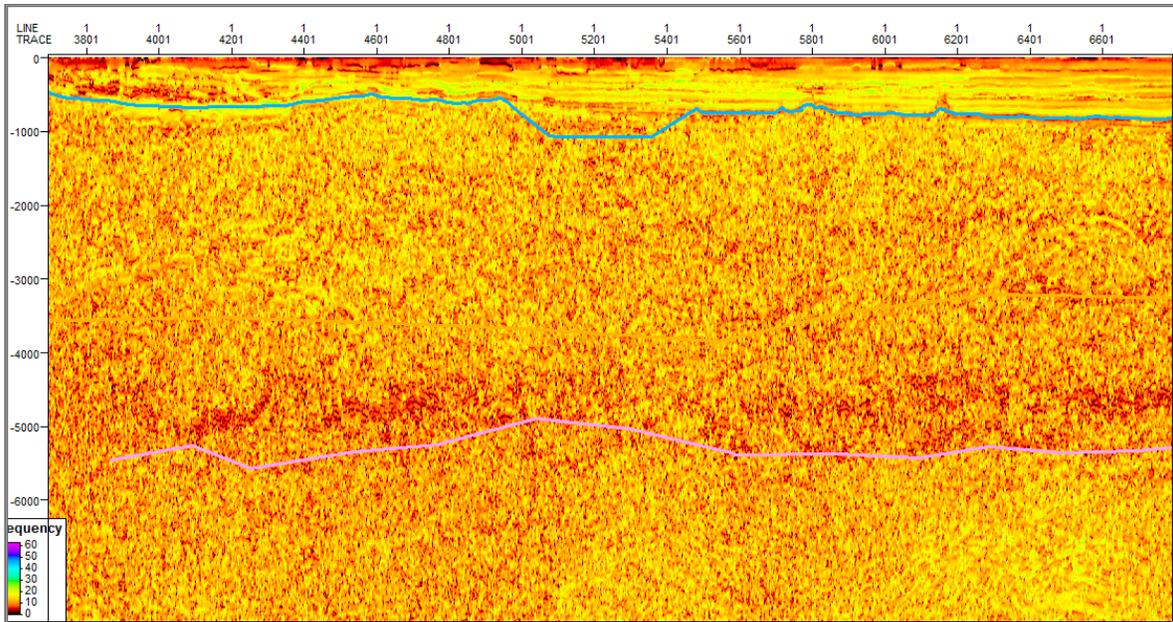


Fig. 5.23 Sección Sísmica Chicx A. Con este atributo se observan con mayor facilidad las zonas fracturadas; en el paquete A1, se observa una zona de mayor fracturamiento entre la traza 5001 y 5401, exactamente en el límite con el paquete dos, esto se deduce debido a las bajas frecuencias enmarcadas en color rojo pardo.



En esta sección Chicxá, se aprecia que la continuidad lateral del paquete A1 está bien definida, lo que caracteriza la parte perteneciente al Terciario.

Con dicho atributo también se afirman la existencia de otro paquete diferente lo que ya se había mencionado anteriormente, cuando se aplicó el structural smoothing, ya que el grosor de los estratos que lo componen es mayor que el del paquete dos; así como también se observa que en el paquete A3 a pesar de los pliegues antiformes y sinformes (marcados en color azul), la continuidad lateral de los estratos es bastante aceptable, a diferencia del paquete A2, pues también ahí se observan un par de pliegues, pero la continuidad lateral es bastante mala. La presencia de dichos pliegues data que la roca que ahí se encuentra es bastante dúctil. De la estructura en un principio mencionada, la cual se ubica entre la traza 6001 a la 6601, este atributo ayuda a observar la configuración de estratificación, zonas de fracturamiento y fallas, con este atributo se visualiza esta estructura, compuesta por dos diferentes tipos de roca; tal vez se trata de un intrusivo (marcado en color amarillo), el cual causa esta disposición de echado al estrato superior (marcado en color naranja),

#### Atributo de envolvente de amplitud

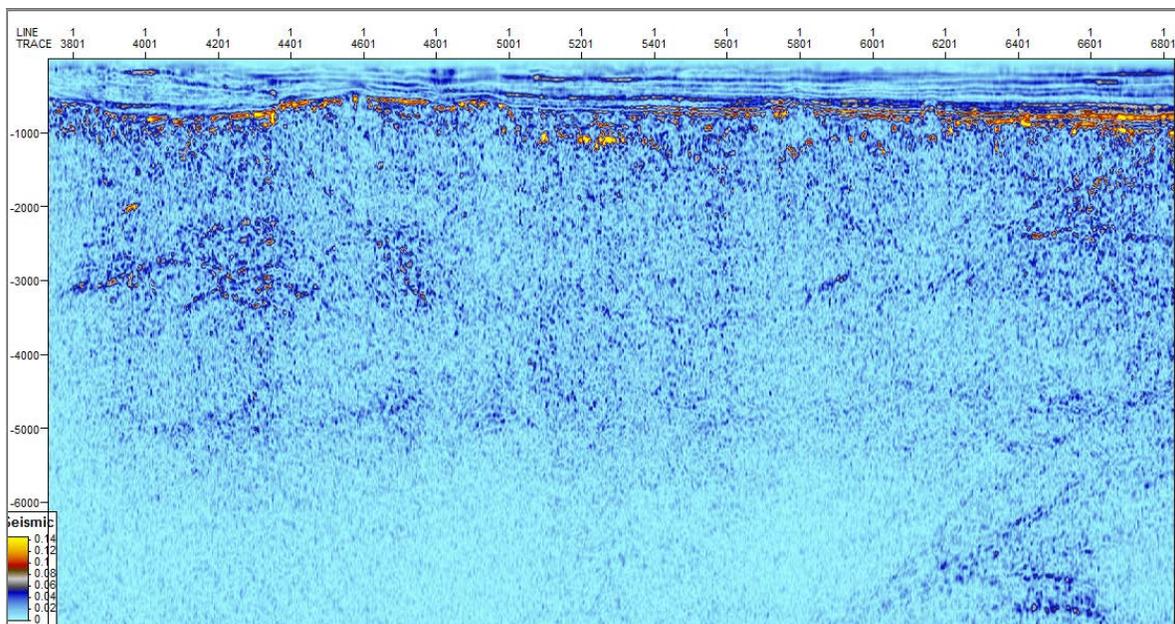


Fig. 5.26 Atributo de Envolvente de Amplitud. Con este atributo se observan los cambios litológicos, de acuerdo al contraste de impedancia que existe entre cada tipo de roca, así como también los puntos brillantes.

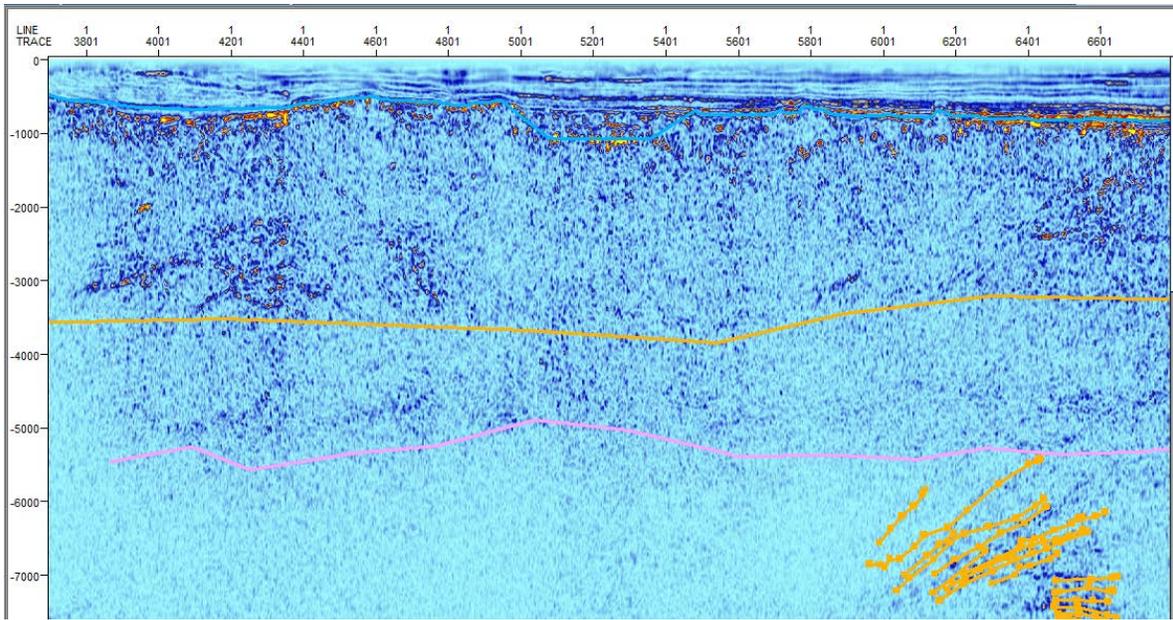


Fig. 5.27 Sección Sísmica Chicx A. Atributo de Envolverte de Amplitud.

Como se puede observar, el intrusivo del cual se habló con el atributo de frecuencia, con este atributo se descartar dicha interpretación, ya que esta estructura, en general, pertenece a un mismo tipo de litología, por la amplitud que presenta. Esta estructura se puede asociar al impacto del meteorito, con un hundimiento, que se observa en el paquete A1, entre la traza 5001 y 5401; dicho impacto, provocó el colapso de este bloque, y a su vez en profundidad, una serie de fracturas y fallas de los estratos, lo cual provocó la ruptura de los mismos, con dicha disposición de echado, ya que como se observa, la energía se dispersa en dicho paquete A4.

## Diagrama de Línea.

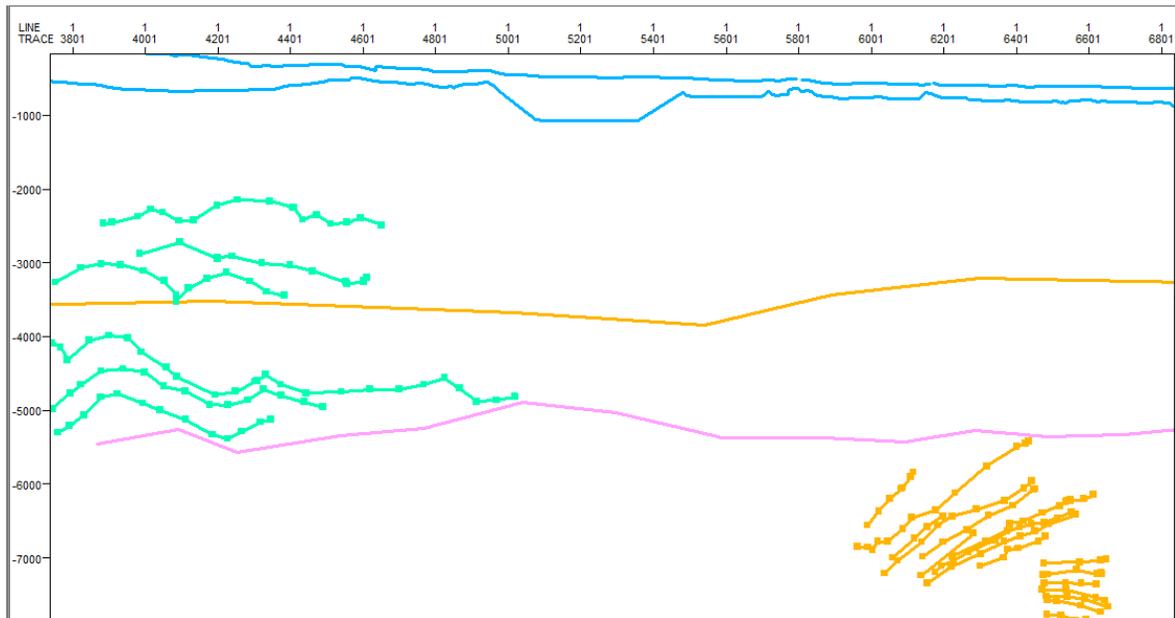


Fig. 5.28 Sección Sísmica A. Diagrama final de línea

El diagrama final de línea que se obtuvo después de aplicar los atributos a la sección sísmica. Como podemos observar, destaca que las características de cada paquete de roca antes descritos son variables, en el que resaltar los pliegues que se visualizan en los paquetes A2 Y A3; ya que, para el sistema petrolero estos funcionan como trampas para el aceite, y la profundidad a la que los ubicamos, entran dentro de la profundidad ideal, si este fuera el caso y el objetivo de dicho estudio sísmico, lo que indica que los atributos sísmicos son de vital importancia.

### 5.2.3 LINEA CHICX R4

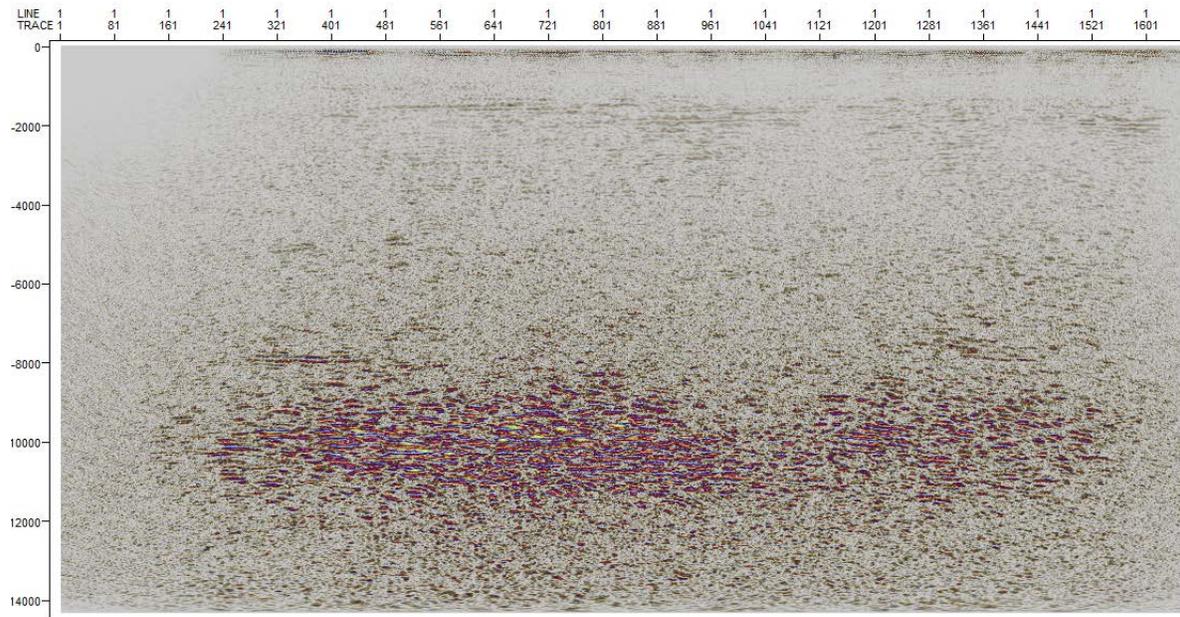


Fig. 5.29 Sección Sísmica Chicx R4.

Como se observan en esta imagen, el contraste de impedancia que existe entre los estratos, no está bien definido; con esta imagen, sin aplicar ningún atributo, se definen dos horizontes con un contraste de impedancia bien marcado; el primero de los 0 a los 8000 [ms], y el segundo de los 8000 [ms] a los 14000 [ms].

## StructuralSmoothing.

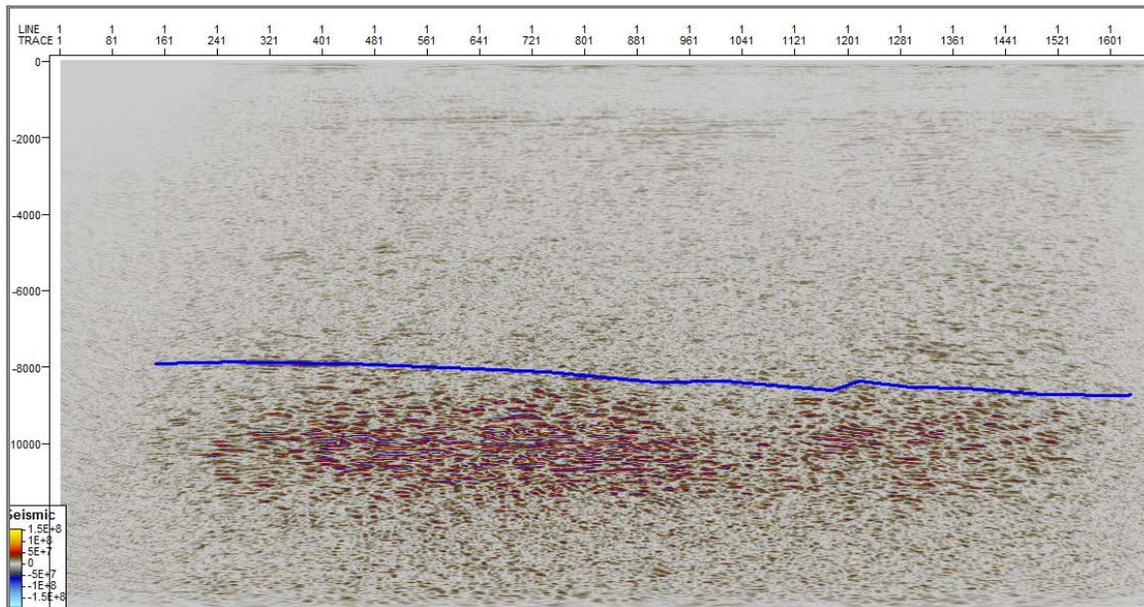


Fig. 5.30 Sección Sísmica Chicx R4. StructuralSmoothing.

En esta imagen se aprecian los dos horizontes antes mencionados de diferentes tipos de roca, el primer horizonte R1 (marcado en color azul), se aprecia de los 0 a los 8000 [ms] y el segundo horizonte comienza a los 8000[ms].

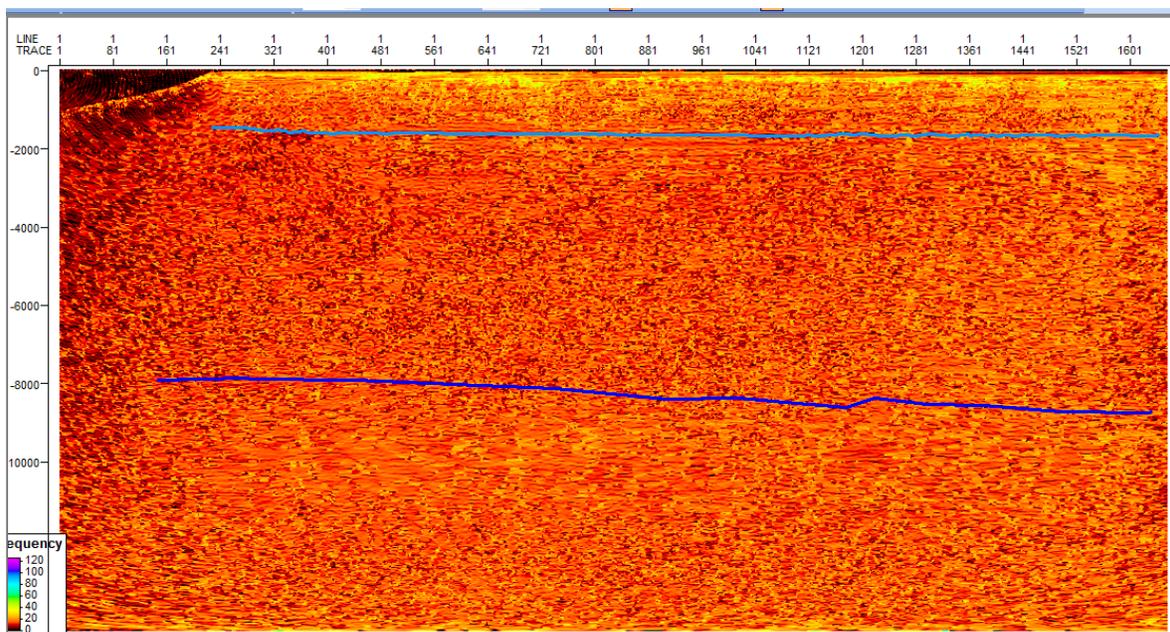


Fig. 5.31 Atributo de Frecuencia Instantánea. Sección Sísmica Chicx R4.

Con este atributo se define un primer horizonte con una frecuencia distinta al anterior horizonte mencionado como primero; con este se identifican tres horizontes diferentes: el primer horizonte R1 (marcado en color azul), de los 0 a los 1800 [ms]; el segundo horizonte R2 (marcado en color azul marino), que va de los 1800 a los 8000 [ms] y, el tercer horizonte R3 comienza a los 8000[ms].

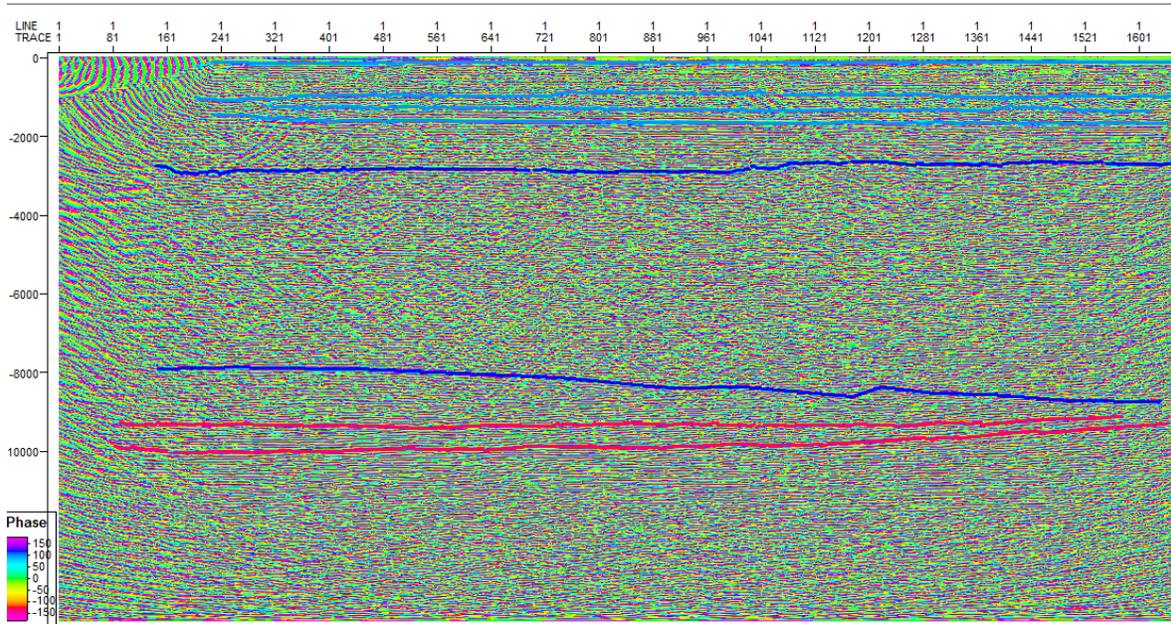


Fig. 5.32 Atributo de Fase Instantánea. Sección Sísmica Chicx R4.

Con este atributo se observa que el horizonte R1 tiene una continuidad lateral bastante buena, característica que en el horizonte R2 no se repite, pues son pocos los estratos que presentan dicha continuidad (marcados en color azul marino). En el horizonte R3, nuevamente se observa que la continuidad lateral de los estratos (marcados en color rojo) es bastante baja.

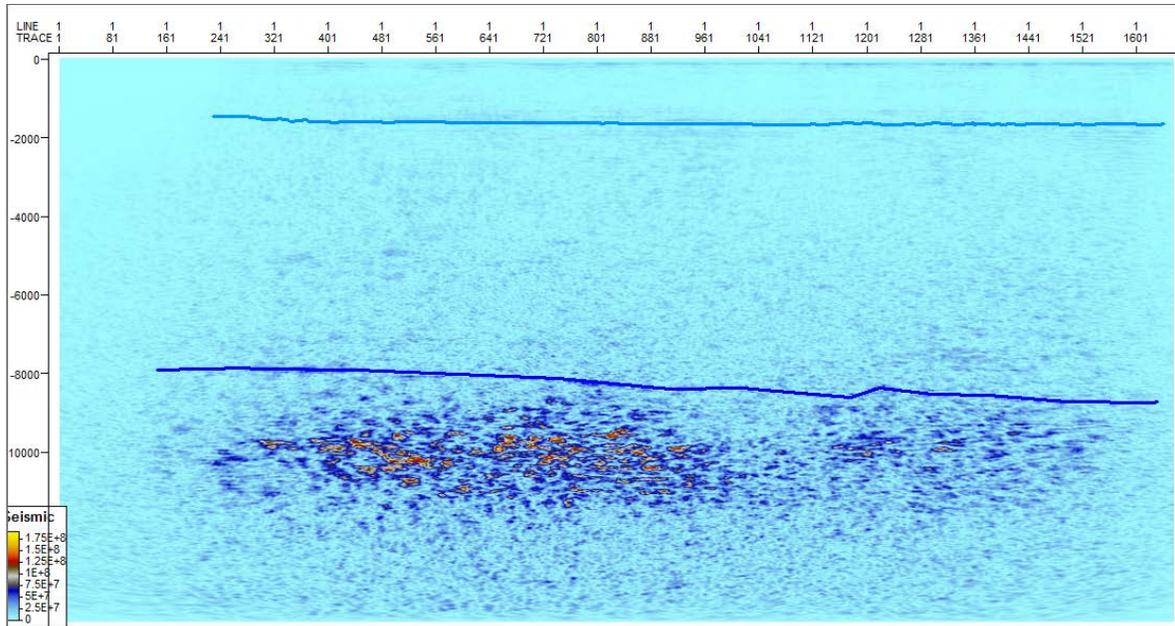


Fig. 5.33 Atributo de Envolvente de Amplitud, para la sección sísmica Chicx R4.

Con este atributo se observan; dos zonas con diferente energía; la primera, es una zona de baja energía, abarca el horizonte R1 y R2, y la segunda zona es de alta energía; esta se localiza en el horizonte R3. Con este atributo se identifica que en este ultimo horizonte se encuentran puntos brillantes (en color amarillo), los que se asocia a material rocoso bien consolidado, si se estuviera buscando aceite, se ubica fácilmente con este atributo, ya que sirve también como indicador de hidrocarburos.

## Diagrama de línea final

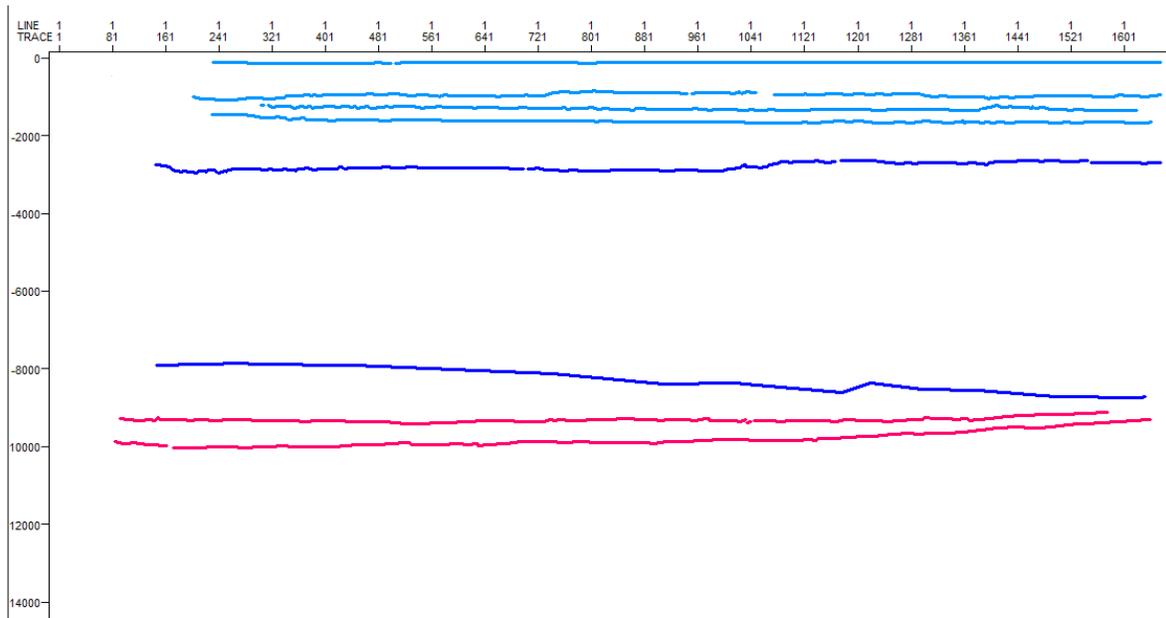


Fig. 5.34 Sección Sísmica Chicx R4. Diagrama de línea final.

En el diagrama de línea final, se puede observar la continuidad de los estratos de los diferentes horizontes antes descritos, R1, R2 y R3.

## CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El cráter Chicxulub es una estructura formada en la plataforma carbonatada en el límite Cretácico-Paleógeno, que formó una cuenca de depósito durante el Cenozoico. El cráter tiene un diámetro de 200 km, con patrones de fracturamiento radial que se extienden otros 100 km. Las características estructurales, estratigrafía de las secuencias carbonatadas dentro y fuera del cráter, y la influencia en la sedimentación en la plataforma pueden ser estudiadas a partir de los levantamientos de reflexión sísmica y directamente con la perforación. En este trabajo se presentan los resultados del análisis e interpretación de perfiles sísmicos marinos que cruzan el cráter, utilizando atributos sísmicos y sismogramas sintéticos. Los análisis de atributos sísmicos proporcionan una caracterización de las propiedades petrofísicas y de la geometría y arreglos en las imágenes sísmicas. A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este estudio.

### **6.1 Conclusiones**

Después del estudio y análisis que se realizó a las imágenes sísmicas Chic R4, Línea ChicxC y Línea ChicxA, mediante los atributos sísmicos, y la generación del sismograma sintético con las mediciones de los núcleos hechos en el laboratorio, se llegó a las siguientes conclusiones:

Con el análisis de los núcleos recuperados por la perforación a través de las mediciones hechas en el laboratorio, se obtuvieron mediciones de densidad y velocidad  $V_p$ , obteniendo su correspondiente registro de dichas propiedades petrofísicas, que representan una herramienta práctica para definir el amarre de las secciones, ya que es posible observar variaciones en los registros que indican cambios de facies en la columna estratigráfica.

Al obtener el coeficiente de reflexión y hacer la correlación con la columna geológica (fig. 4.2), se pudo observar el cambio de facies que existe entre los horizontes.

Los datos medidos en laboratorio de los núcleos adquiridos, proporciona resultados más directos de las propiedades de dichas rocas, velocidad de onda P y densidad, y esto a su vez, al generar el sismograma sintético, se obtiene la forma de propagación de la onda sísmica.

El contrastar la información de tres atributos sísmicos, Fase Instantánea, Frecuencia Instantánea y Envoltente de Amplitud permitió obtener las siguientes características de las secciones sísmicas, la estratigrafía y propiedades petrofísicas de las secuencias:

De manera general el área de la plataforma de Yucatán donde se formó el cráter está compuesto por tres horizontes estratigráficos calcáreos con propiedades petrofísicas diferentes; y estos a su vez, se encuentran a una tiempo [ms] muy similar en la Sección Chicx A (A1, A2 y A3) y Chicx C (H1, H2 y H3); estos mismos difieren del tiempo [ms] al cual se encuentran dichos horizontes en la Sección Chicx R4 (R1, R2 y R3), debido a la ubicación de las líneas en el cráter de impacto.

El atributo de fase instantánea es de utilidad en la interpretación de las imágenes sísmicas, con el cual el intérprete debe comenzar, puesto que, en este atributo, se encuentran todos los eventos representados. En el cálculo del atributo no se toma en cuenta la amplitud de la onda, lo cual es bastante favorable por el ahorro de tiempo en la interpretación, ya que con dicho atributo se identifican, rasgos que pueden ser de interés para el intérprete y así él puede particularizar en ellos, con los atributos correspondientes.

El atributo de Frecuencia Instantánea nos permite detectar zonas de fracturamiento y fallamiento, enmarcadas en zonas de bajas frecuencias, tal es el caso de la Sección Sísmica Chicx C, donde se corrobora el fracturamiento y fallamiento del subsuelo que se presenta como zonas de baja energía en la Fig. 5.9.

Con el atributo de Fase Instantánea nos permite ver las estructuras que se forman como resultado de la disolución de los carbonatos, como lo son cuencas de relleno (fig. 5.13) y acuñamientos (fig. 5.15) ya que en este atributo están representados los eventos.

El empalme que se realizó de la sección sísmica Chicx A con el sismograma sintético permite correlacionar los picos ubicados en el sismograma, marcando posibles cambios de litología. El amarre que se hizo de este empalme con la sección sísmica Chicx C, es bastante aceptable, tomando en cuenta que las dos secciones tocanparte del cráter de impacto en la dirección SW, donde se ubicó el sismograma a la misma distancia del cráter y a la misma profundidad en ambas secciones.

## 6.2 Recomendaciones

Se recomienda obtener más mediciones de los núcleos en el laboratorio, esto para tener un intervalo más grande de mediciones y así generar nuevamente el sismograma y tener un amarre más exacto con las secciones sísmicas.

Se recomienda hacer la comparación del sismograma obtenido con el registro sísmico de pozo, para poder verificar el grado de exactitud de los datos obtenidos en laboratorio; así como para comparar el comportamiento de la onda en el medio, con los mismos datos, pero adquiridos y procesados de diferentes formas, con registros sísmicos y sismogramas sintéticos.

## BIBLIOGRAFIA.

Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F., Michel, H.V., 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous Tertiary extinction. *Science*, 280, 1095-1108.

Chopra, S., and Kurt j. Marfurt. Seismic Attributes — A Historical perspective 75th Anniversary.

Gulick, S., Barton, P., Christeson, G., Morgan, J., MacDonald, M., Mendoza, K., UrrutiaFucugauchi, J., Vermeesch, P., Warner, M., 2008. Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater. *Nature Geoscience*, 1, 131-135.

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

Hildebrand, A., Pilkington, M., Ortiz, C. Chavez, R., UrrutiaFucugauchi, J., et al., 1998. Mapping Chicxulub crater structure with gravity and seismic data. In: *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects*, Grady, R. et al. (Eds.), Geological Society Special Publication, 140, 155-176.

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

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, p. 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, p. 346-354.

Ortiz-Aleman, C., Urrutia J., 2011. Central zone structure and magnetic sources in the Chicxulub Crater, as derived from three-dimensional modeling of aeromagnetic anomalies.

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

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

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

Sheriff, R., 1980, *Seismic Stratigraphy*, IHRDC.

Urrutia, J., Camargo, A., Pérez L., 2010, The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico, *Geofísica Internacional*, 50-1, p. 99-127.

Urrutia, J. Pérez L., 2008. Post-impact carbonate deposition in the Chicxulub impact crater region, Yucatan platform, Mexico. *Current Science*, 95, 241-252.

Urrutia, J., L. Marin, V.L. Sharpton, 1994. Reverse polarity magnetized melt rocks from the Cretaceous/Tertiary Chicxulub structure, Yucatan peninsula, Mexico, *Tectonophysics*, 237, 105-112.

Urrutia, J., Marin, L., Trejo, A., 1996. UNAM scientific drilling program of Chicxulub impact structure Evidence for a 300 kilometer crater diameter. *Geophysical Research Letters*, 23, 1565-1568.

Urrutia J., Morgan, J., Stoeffler, D. Claeys, P., 2004. The Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP). *Meteoritics and Planetary Science*, 39, 787-790.

Urrutia, J., Chávez, J.M., et al 2008. Impact ejecta and carbonate sequence in the eastern sector of Chicxulub Crater. *Comptes Rendus Geosciences*, 341, 801-810 doi:10.1016 /j.crte.2008.09.001

Vermeesch, P.M., Morgan, J.V., 2004. Chicxulub central crater structure: Initial results from physical property measurements and combined velocity and gravity modeling. *Meteoritics and Planetary Science*, 39, 1019-1034.

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