



**Universidad Nacional Autónoma de México**

**Facultad de Ingeniería**

**Interpretación de perfiles sísmicos mediante  
Atributos Sísmicos en la zona del Cráter Chicxulub**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERA GEOFÍSICA**

Presenta:

**Melisa Martínez Hernández**

Director:

**Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi**



**México D.F 2013**

# Agradecimientos

A mi alma mater, mi querida Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de ser una profesionalista, por enseñarme el orgullo y el amor de pertenecer a ella.

A mi director de Tesis, Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi por todo el apoyo, paciencia, enseñanzas y tiempo, por haberme brindado un espacio para trabajar así como por las experiencias acumuladas a lo largo de este tiempo y en especial por haber confiado en mí y darme la oportunidad de pertenecer a su legado.

A mi jurado por sus valiosas correcciones, aportaciones, atenciones y orientaciones las cuales me ayudaron a mejorar este trabajo, en especial al Dr. Joaquín Aguayo por su tiempo y disposición.

A mi madre y a mi padre por haberme apoyado incondicionalmente a lo largo de este tiempo, por sus palabras de aliento, por nunca dejarme caer a pesar de mis frustraciones, por estar a mi lado en cada momento, por su cariño y amor, por ser mi ejemplo de superación y por ser siempre los más grandes pilares de mi vida. Los quiero y saben que este trabajo es por y para ustedes.

A mi hermana Mildred por estar a mi lado siempre apoyándome, por ser mi cómplice de vida y ser un ejemplo para mí a pesar de nuestras diferencias.

A mi tío Víctor por siempre apoyarme y alentarme a seguir.

A mis amigos con los cuales he compartido este largo camino en el cual aprendimos juntos, en especial a mis amigas: Nancy, Nidia, Mara, Tania y Gaby con las que compartí la mitad de la carrera y aventuras, porque siempre estuvimos ahí para todas cuando más nos necesitamos forjando una amistad sincera, a mis amigos: Germán e Itzel porque siempre vamos a estar juntos sin importar las distancias.

A mis hermanos de tesis Alejandro y Alberto, con los que tuve la fortuna de encontrarme en el cubo, porque siempre tuvieron el tiempo suficiente para resolver mis dudas geológicas a pesar de sus ocupaciones, por recibirme a diario con una enorme sonrisa y por todas nuestras grandes experiencias así como aventuras.

# Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>2</b>
<b>Capítulo 2. Cráter Chicxulub.....</b>	<b>4</b>
2.1 Zona de Estudio: Cráter de Chicxulub.....	4
2.1.1 Localización .....	4
2.1.2 Geología de la Zona.....	5
2.2 El Cráter Chicxulub .....	7
2.3 Estudios Previos .....	8
2.3.1 Reflexión Sísmica.....	8
2.3.2 Estudios Magnetométricos y Gravimétricos .....	10
2.3.3 Información de Pozos y Análisis de Núcleos .....	11
<b>Capítulo 3. Fundamentos .....</b>	<b>12</b>
3.1 Conceptos Generales .....	12
3.2 Traza Compleja.....	13
3.3 Transformada de Hilbert.....	14
3.4 Resolución Lateral y Vertical.....	14
3.5 Clasificación de los atributos sísmicos .....	16
3.5.1 Atributos de Traza Compleja.....	16
3.5.1.1 Coseno de la Fase.....	16
3.5.1.2 Atributo Envolvente (Envelope).....	16
3.5.1.3 Frecuencia Instantánea .....	17
3.5.1.4 Fase Instantánea .....	17
3.5.1.5 Caos.....	18
3.6 Sísmica de Reflexión.....	18
<b>Capítulo 4 Adquisición y Procesado .....</b>	<b>20</b>
4.1 Adquisición Marina .....	20
4.1.2 Campaña del 2005 .....	21
4.2 Procesado.....	25
4.2.1 Procesado de las Líneas .....	28
4.3 Petrel.....	28

<b>Capitulo 5. Análisis de Resultados y Discusión</b> .....	<b>28</b>
5.1 Resultados.....	28
5.1.1 Líneas Sísmicas.....	28
5.2 Suavizado Estructural.....	31
5.3 Interpretación.....	35
• <b>Chicx13b</b> .....	35
• <b>Chicx16</b> .....	40
• <b>Chicx23</b> .....	45
• <b>Chicx23A</b> .....	49
• <b>Chicx24</b> .....	55
<b>Capitulo 6 Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	<b>60</b>
6.1 Conclusiones.....	60
6.2 Recomendaciones.....	61
<b>Bibliografía</b> .....	<b>62</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>64</b>



## Resumen

El cráter del Chicxulub resultado del impacto de un meteorito hace 65 millones de años el cual ha sido objeto de gran interés en el ámbito científico por ser causante de la extinción masiva de gran cantidad de formas de vida (los dinosaurios). Chicxulub es uno de los cráteres con mayor tamaño que muestra un buen estado de preservación sobre la Tierra. Esto ha dado pauta a diversos estudios geofísicos, tanto gravimétricos como sísmicos entre otros, con el fin de conocer su estructura.

Los perfiles sísmicos analizados en este trabajo fueron obtenidos en el Experimento Sísmico Chicxulub durante el 2005, por la UNAM en conjunto con otras universidades; tienen la finalidad de interpretarlas para poder definir la estructura del cráter y con esto poder hacer un modelado 3-D, ya que los estudios sísmicos son los que aportan mejores datos para la obtención de imágenes de alta resolución del subsuelo.

Los atributos sísmicos son una excelente herramienta en la industria petrolera para resaltar ciertas características del subsuelo así como sus propiedades petrofísicas, las cuales nos dan un indicio de la historia evolutiva de las zonas a estudiar así como la posibilidad de localizar zonas de interés económico para la industria.

Las líneas sísmicas utilizadas son: Chicx13b, Chicx16, Chicx23, Chicx23A y Chicx24, que se localizan en el sector central al noreste del cráter en la zona de anillo de picos y levantamiento central. Las líneas tienen longitudes entre 11 y 25 km, con un total de 104 km. La línea Chicx13b está orientada paralela a la costa y las 4 otras líneas están orientadas perpendiculares a la costa. El uso de atributos sísmicos en este trabajo permitió definir algunas estructuras geológicas del cráter y de los depósitos carbonatados que rellenan la cuenca, al igual que permitió ver en cierto punto el daño que el meteorito ocasiono a las capas sedimentarias en la zona del impacto. Para esto se utilizaron de manera en conjunta 4 diferentes atributos sísmicos los cuales son: Envolvente de Amplitud, Caos, Coseno de la fase y Fase instantánea, mediante el programa de Petrel, el cual es uno de los más utilizados en la industria para este tipo de proyectos.

### Capítulo 1. Introducción

La Geofísica en la exploración petrolera a lo largo del tiempo ha sido de gran utilidad, ya que sus distintos métodos geofísicos han servido para la solución de distintos problemas que se presentan en este ámbito. La sísmica ha sido el método geofísico que mas aportaciones ha hecho, a partir de que comenzó a ser utilizada para fines petroleros desde el año de 1920 con gran éxito y con el tiempo ha ido evolucionando conforme las necesidades de la industria.

Los atributos sísmicos surgieron como una herramienta para analizar problemas de visualización para el intérprete. Esta metodología se desarrolló alrededor de los años 70's, siendo Turhan Taner considerado como el padre de los mismos. Hoy en día existen numerosos tipos de atributos sísmicos los cuales ayudan al intérprete a resaltar ciertas características de interés, para caracterizar propiedades petrofísicas, localizar fallas, fracturamientos y acumulaciones de gas, entre otros.

Los métodos de exploración geofísica han permitido estudiar más a fondo uno de los acontecimientos que marcó el final e inicio de dos eras geológicas, el cual fue el impacto de asteroide que ocurrió en la plataforma de Yucatán hace aproximadamente 65 millones de años, dejando una estructura de tipo multianillo que mide cerca de 200 km de diámetro y que actualmente se encuentra sepultada bajo 1 km de rocas carbonatadas.

Los efectos del impacto han sido relacionados a la extinción de numerosas especies a fines del Cretácico y a los cambios globales en el clima y en el ambiente terrestre; que marcan la frontera de Cretácico/Paleógeno (K/Pg). Por tales motivos, han despertado mucho interés en el ámbito científico las investigaciones del impacto, la frontera K/Pg y las extinciones de organismos, haciéndolos objeto de distintos tipos de estudios, los cuales comenzaron en la década de 1970's (Alvares et al., 1980; Schulte et al., 2010).

Los estudios iniciales sobre las secuencias sedimentarias y estructuras en Yucatán se iniciaron como parte de los programas de exploración petrolera en el sureste de México por Petróleos Mexicanos, en la década de los 1940's. Los estudios de gravimetría permitieron identificar una estructura en el sector norte de la península. Los pozos exploratorios documentaron la presencia de rocas ígneas de composición andesítica, que apoyaron la interpretación en términos de una caldera volcánica. Los trabajos de aeromagnetometría a finales de los 1970's, combinados con los otros trabajos de apoyo terrestre ofrecieron una explicación alternativa como un cráter de impacto (Penfield y Camargo, 1981). Este origen se ha confirmado con los nuevos estudios y programas de perforación (Hildebrand et al., 1991, 1998; Sharpton et al., 1992, 1993; Urrutia et al., 2004, 2008). A partir de 1990, los estudios geofísicos en Chicxulub se han extendido, con el fin de poder definir su estructura, siendo estudios sísmicos marinos uno

de los principales pues cierta parte del cráter se encuentra localizada bajo las aguas del Golfo de México (Gulick et al., 2008; Morgan et al., 2006).

En este trabajo se analizan datos del proyecto sísmico marino de Chicxulub obtenidos durante el 2005, las líneas utilizadas son: Chicx13b, Chicx16, CHicx23, CHicx23A y Chicx24; siendo las 4 últimas líneas perpendiculares a la línea de costa, mientras que la Chicx13b es paralela a ésta. Las 5 líneas se localizan dentro de la zona de impacto estando del centro del cráter; los atributos sísmicos para el estudio e interpretación de estos perfiles sísmicos.

El uso de los atributos sísmicos en este trabajo tiene como finalidad demostrar que estos son una buena herramienta para la interpretación de los perfiles marinos.



## Capítulo 2. Cráter Chicxulub

### 2.1 Zona de Estudio: Cráter de Chicxulub

#### 2.1.1 Localización

La Península de Yucatán se localiza al sureste de México con una extensión de 300,000 km<sup>2</sup>, entre los paralelos 16° a 22° latitud Norte y 86° a 91° longitud W del meridiano de Greenwich (López Ramos, 1975); se encuentra en los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán en su parte mexicana, y también incluye una parte de territorio de Belice y Guatemala. La península colinda al norte y oeste con El Golfo de México, al este con el mar Caribe, hacia el sur, con los países de Belice y Republica de Guatemala (Figura 1).



Figura 1. Localización de la Península de Yucatán.

En esta parte del territorio se encuentra la llamada Plataforma carbonatada de Yucatán la cual se caracteriza por ser una zona con una topografía en general plana y cuyo clima la mayor parte del tiempo es cálido y húmedo; la mayoría de su escurrimiento fluvial es subterráneo lo que da origen a un sistema de formas cársticas (Lugo-Aceves-Espinasa, 1992), que se conocen como cenotes, los cuales tienen un rasgo circular característico en su topografía.

### 2.1.2 Geología de la Zona

El bloque de Yucatán carece de plegamientos o de actividad volcánica, el Paleozoico se encuentra limitado por la falla Montagua en Centro América, en él se encuentran rocas del basamento, las cuales están expuestas en las zonas de las Montañas Mayas. El basamento metamórfico formó parte del continente conocido como Pangea; éste basamento se localiza al Norte de Yucatán, se separó del Bloque Louisiana-Texas al momento de la apertura del Golfo de México; su posición actual viene a partir del Triásico-Jurásico (aprox. 190 a 200 millones de años) y se relaciona con la traslación y rotación del bloque de Yucatán durante la formación del Golfo (Padilla Sánchez, 2007). Sobre este basamento se ha acumulado una gruesa capa de sedimentos marinos del Paleozoico Marino, seguido por sedimentación continental en el Jurásico, que a su vez subyacen un depósito extenso de evaporitas, las cuales corresponden a una plataforma carbonatada limitada por arrecifes del Cretácico Temprano, que a su vez, subyacen a calizas depositadas de plataforma del Cretácico ; es importante mencionar que en la frontera entre el Cretácico y el Terciario se localiza la estructura de impacto de Chicxulub.

La plataforma de Yucatán, conformada por calizas del Cretácico (144 a 165 millones de años) al Cenozoico-Terciario (65 millones de años al Reciente), refleja un declive temporal en sentido norte-sur, posteriormente hubo una emergencia paulatina de la plataforma de Yucatán durante el Plioceno (5.2 a 1.8 millones de años).

El tercio norte y la mitad oriental de la península están formados por calizas con desarrollo de karst, con elevación de 10 m, compuestos por secuencias horizontales de capas de calizas y dolomías del Cretácico Tardío (Plioceno), las cuales forman parte de la Formación Carrillo Puerto, limitada por los depósitos periféricos del Cuaternario. La Formación Carrillo Puerto tiene un espesor aproximado de entre 163 a 240 metros.

Los depósitos del Cuaternario están restringidos a una franja periférica angosta a lo largo de la costa norte la cual está formada por depósitos de calizas; mientras que en la costa noreste los depósitos del Cuaternario, (Pleistoceno) se interpretan como carbonatos supra-mareales, los cuales reflejan movimientos de la línea de costa (Figura 2.1).

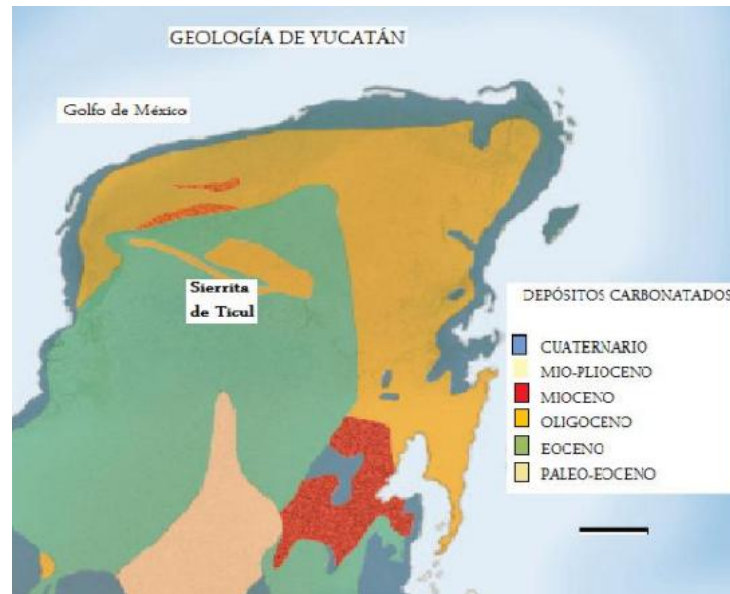


Figura 2.1 Distribución Superficial de los carbonatos de la Península de Yucatán (Revista Mexicana de Arqueología Mexicana, AGT, México, 2002)

Estratigráficamente la plataforma posee un basamento cristalino-volcánico perteneciente al Neo-Proterozoico hasta al Paleozoico Tardío, el cual está oculto bajo la cobertura sedimentaria del Mesozoico (Jurásico-Cretácico) y del Cenozoico. Las rocas sedimentarias más antiguas se encuentran sepultadas por rocas más jóvenes del Cretácico y Cenozoico, y que por correlación regional con unidades semejantes del SE de México (Formación Todos Santos), se les asignó una edad del Jurásico Medio-Tardío.

De manera discordante sobre estas rocas continentales, sobre yace una secuencia gruesa de carbonatos y evaporitas del Cretácico; ésta se encuentra interrumpida bruscamente por los depósitos del límite Cretácico-Terciario, los cuales se asocian al impacto de Chicxulub. Los carbonatos, por lo general, se encuentran fuertemente dolomitizados. El Cuaternario está representado por carbonatos aunque, carente de evaporitas.

Las formaciones más representativas de las secuencias que se encuentran expuestas en la superficie son: Icaiche (Paleoceno-Eoceno medio-temprano), Piste y Chichen-Itzá (Eoceno medio y tardío), Bacalar (Mioceno) y Carrillo Puerto (Mioceno-Plioceno); las formaciones pertenecientes al Oligoceno (calizas, lutitas y margas) y al Cuaternario, no tienen nombres formales. Por información de pozos y afloramientos, los espesores medidos para estos grupos de estratos varían entre 1,000 y 3,000 m.

La plataforma de Yucatán en la periferia del Golfo de México, durante el Jurásico sufrió, una intensa deformación extensional dando origen a fallas y grabens en los que se depositaron los sedimentos calcáreos.

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

### 2.2 El Cráter Chicxulub

Se localiza al noreste de la Península de Yucatán y el nombre de éste, se debe a que su centro se encuentra en el pueblo pesquero de Chicxulub. El cráter se formó debido al impacto de un cuerpo proveniente del espacio exterior el cual contaba con un diámetro de unos  $\geq 10$  km; el impacto ocurrió hace aproximadamente 65.5 millones de años. Como consecuencia de esto, se formó un cráter de aproximadamente 200 km de diámetro marcando el fin del periodo del Cretácico y el comienzo del Terciario (Como Ves, dic. 2010), lo cual se asocia con uno de los eventos geológicos más importantes, que marca la transición del límite *K/T* o más recientemente llamado límite *K/Pg* (Figura 2.2).

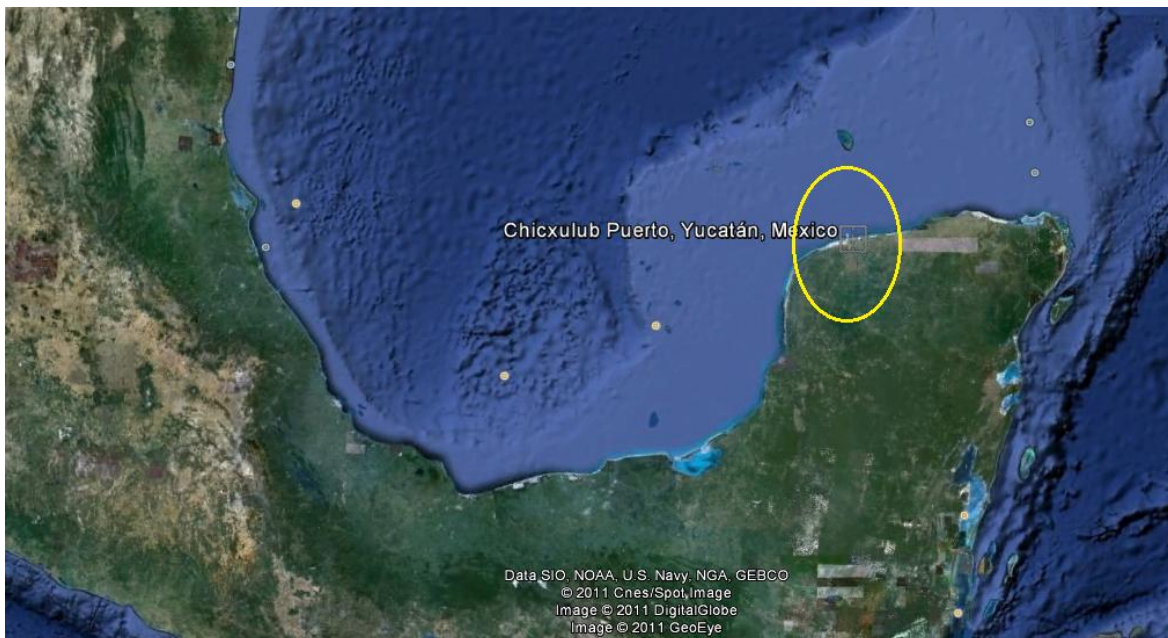


Figura 2.2 Ubicación Geográfica del Cráter Chicxulub, Google Earth 2011.

## 2.3 Estudios Previos

Los primeros estudios geofísicos realizados en la península de Yucatán comenzaron en el año de 1947 por Petróleos Mexicanos, los cuales fueron principalmente estudios gravimétricos, magnetométricos y sísmicos. Años más tarde esta empresa realizó la primera perforación de pozo nombrado Chicxulub No. 1.

Posteriormente en 1980 el geofísico Luis Álvarez y colaboradores llevaron a cabo nuevos estudios, los cuales reportaron la evidencia de una capa delgada de arcilla, la cual se encontraba intercalada con una formación de carbonatos, que marcaba el límite del Cretácico y el Paleogeno.

Este último hecho ha dado pauta a nuevas investigaciones, las cuales han servido para poder estimar la edad, la geométrica y características del cráter, así como la relación de éste con los depósitos de la capa K/T (Como Ves, dic. 2010).

La geofísica ha aportado muchos datos de interés por medio de estudios de sísmica de reflexión, información de pozos y núcleos así como datos gravimétricos y magnetométricos, los cuales han permitido conocer más sobre el cráter Chicxulub.

### 2.3.1 Reflexión Sísmica

Se han realizado distintas campañas en el cráter para poder definir su estructura, algunas de las más relevantes fueron realizadas por PEMEX en 1992 y en 1996, bajo la dirección de GECO Sigma en la cual se logró cubrir una distancia de 647.6 km, con 4 secciones sísmicas (Figura 2.3).

Posteriormente en el 2005, se realizó una nueva adquisición de datos, éste fue un proyecto en conjunto entre distintas Universidades; el grupo fue conformado por el Imperial College, la Universidad de Cambridge, la Universidad de Arizona y la UNAM; esta última dirigiendo el proyecto, en el cual se lograron obtener 29 secciones sísmicas complementando a las ya existentes (Figura 2.4).

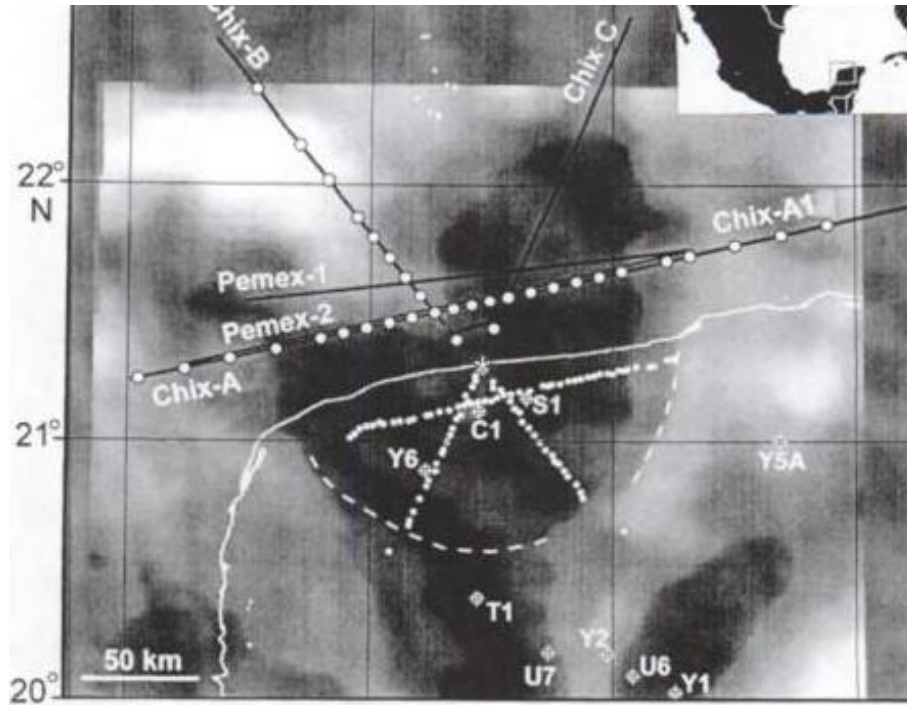


Figura 2.3 Líneas Sísmicas adquiridas por GECO Sigma (Tomada del libro Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II, B.O. Dressler and V.L. Sharpton, 1999).

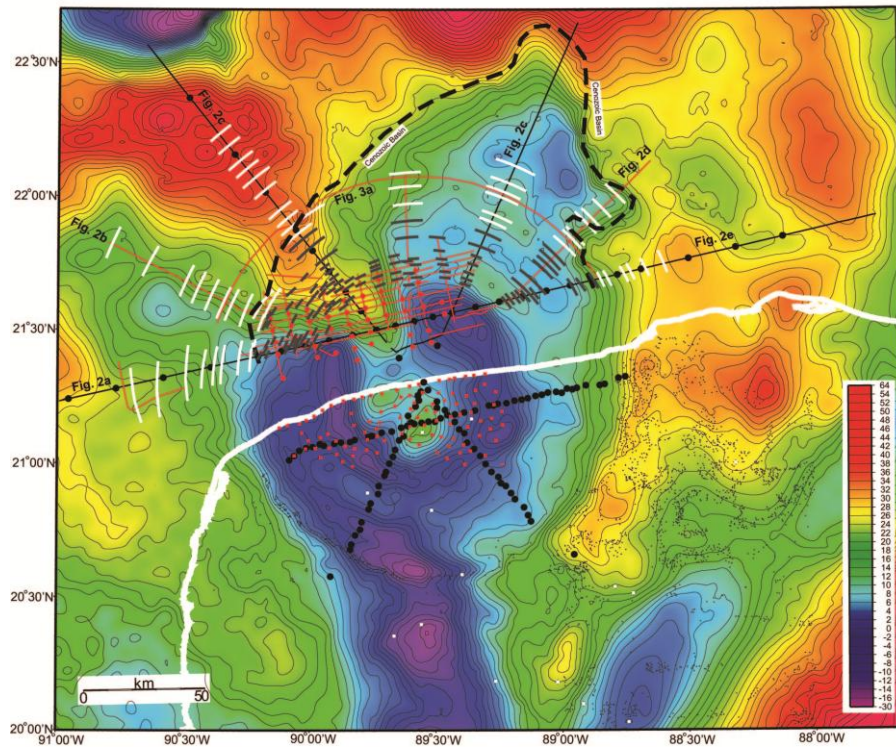


Figura 2.4 Líneas Sísmicas del Cráter Chicxulub

### 2.3.2 Estudios Magnetométricos y Gravimétricos

Estos fueron llevados a cabo por Petróleos Mexicanos en el año de 1947 con el fin de poder realizar perforaciones de pozos, y gracias a los mapas gravimétricos obtenidos posteriormente se pudo definir el diámetro del cráter.

En el año de 1994 se realizaron levantamientos adicionales para tener una mayor cobertura de la zona de estudio y con esto obtener perfiles más detallados acerca de la estructura del cráter para su modelación (Hildebrand et al; 1995, 1998).

Una de las aportaciones de estos estudios fue que se pudo definir que la estructura del cráter Chicxulub es de tipo multianillo (Figura 2.5).

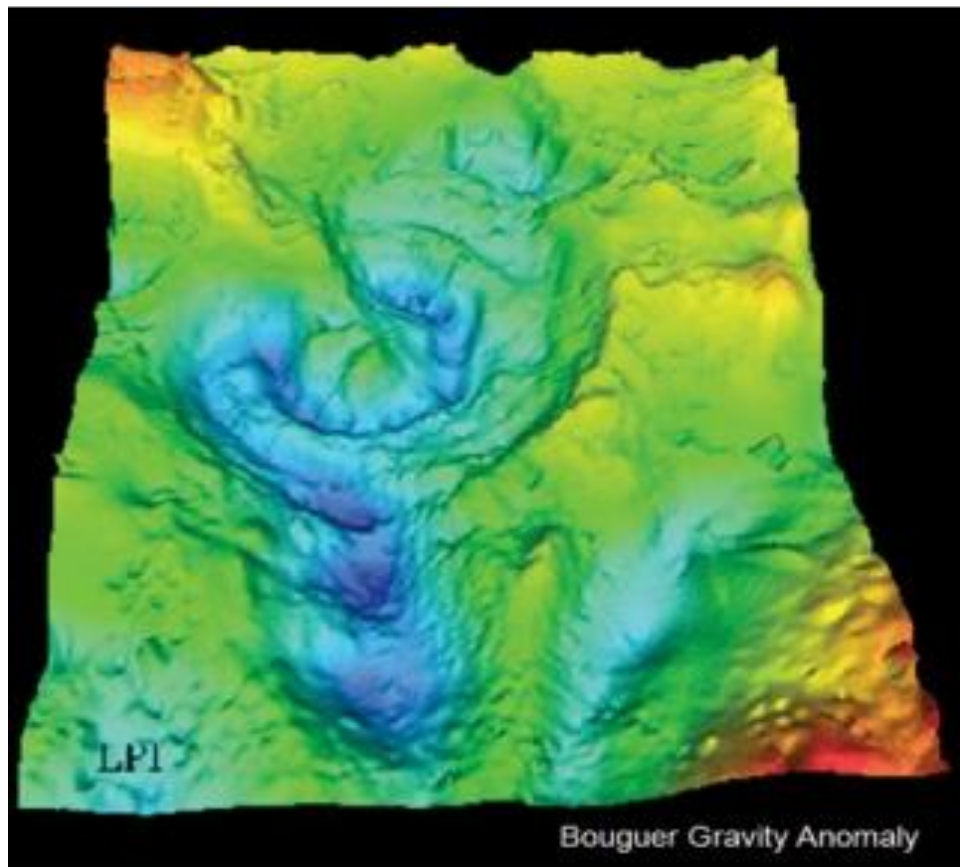


Figura 2.5 Anomalía de Bouguer en 3D sobre el cráter Chicxulub (Urrutia, J. et al., 2010)

### 2.3.3 Información de Pozos y Análisis de Núcleos

Los primeros estudios realizados en el cráter fueron con fines petroleros, han hecho posible poder adquirir una amplia documentación sobre la zona de estudio, entre lo que destaca la adquisición de núcleos, con los que se conocen las rocas del subsuelo y nos ayudan a la correlación con los registros geofísicos, éstos a su vez, permiten conocer las distintas formaciones del subsuelo (Figura 2.6).

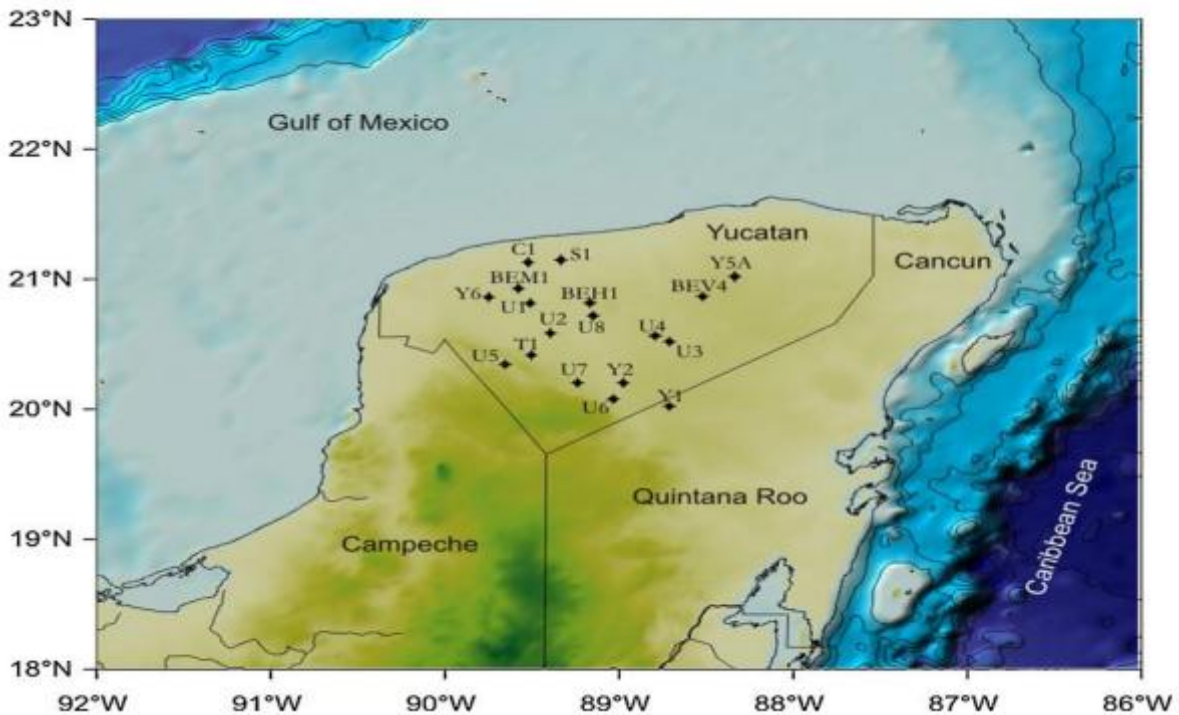


Figura 2.6 Ubicación de los pozo exploratorios (Urrutia J et al., 2011)



## Capítulo 3. Fundamentos

### 3.1 Conceptos Generales

Los atributos sísmicos son una medida cuantitativa de ciertas características sísmicas de interés (Chopra & Marfurt, 2005), se derivan de los datos sísmicos y regularmente están basados en medidas de tiempo, amplitud frecuencia y atenuación (Sheriff et al.,1991); estos surgieron junto con la sísmica de reflexión en 1930 y desde entonces se han hecho presentes en la sísmica de exploración, al mismo tiempo que la tecnología de ésta ha ido evolucionando al grado de contar, hasta la fecha, con más de 50 atributos sísmicos, los cuales son aplicados en la interpretación geológica (la estratigrafía, geología estructural, etc.), ya que su objetivo principal es ofrecer información más detallada y certera al intérprete de los parámetros estructurales, estratigráficos y litológicos que nos ofrecen las imágenes sísmicas. Gracias a estas ventajas hoy en día los atributos sísmicos se han convertido en una herramienta fundamental para la industria petrolera ya que ayudan en la predicción, caracterización y monitoreo de yacimientos.

Un evento de gran importancia se dio en el año de 1970, mejorando las herramientas de trabajo, lo cual hizo posible poder mostrar imágenes a color y con esto la aparición de los primeros atributos sísmicos de traza compleja con los cuales se logró obtener una mayor y mejor información, tanto geológica como geofísica.

Existen distintas formas para clasificar a los atributos sísmicos las cuales dependen del autor y las características que este tome para clasificarlos, por ejemplo: Taner et al. (1994) los clasifica en 2 categorías generales: Físicas y Geométricas; Brown (2004) los divide en: Atributos Antes del apilado y Atributos después del apilado mientras que Liner et al. (2004) los clasifica en: atributos generales y categorías específicas (Figura 3.1). Que se detallarán en los apartados siguientes.

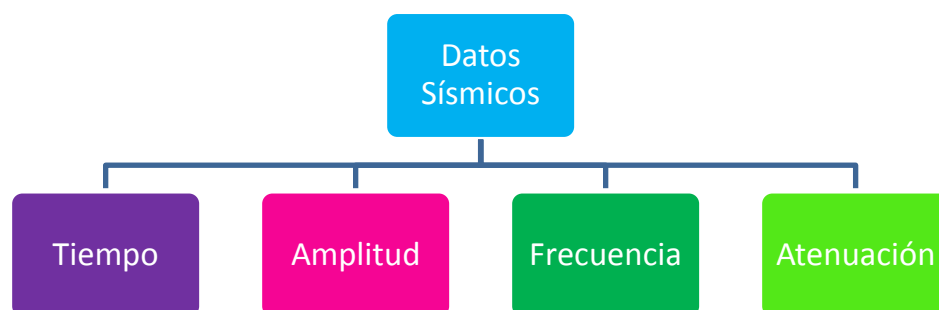


Figura 3.1 Atributos Sísmicos.

### 3. 2 Traza Compleja

El análisis de traza compleja es una técnica de transformación, que es útil en problemas de interpretación. Se utiliza para determinar los atributos sísmicos, sus efectos son la separación de la amplitud y la información de fase.

El análisis de traza compleja nos muestra a la traza sísmica como una sucesión continua de sinusoides que tienen una frecuencia constante y un cambio exponencial de amplitud (Barnes, 2007).

Buscando la representación de un número complejo  $F(t)$  de una serie de tiempo real  $f(t)$ :

$$F(t) = f(t) + j f^*(t) = A(t) e^{j\gamma(t)} \quad (\text{ec. 3.1})$$

Donde  $f$  es la serie en cuadratura,  $A(t)$  es la amplitud de la traza envolvente y  $\gamma(t)$  es la fase instantánea.

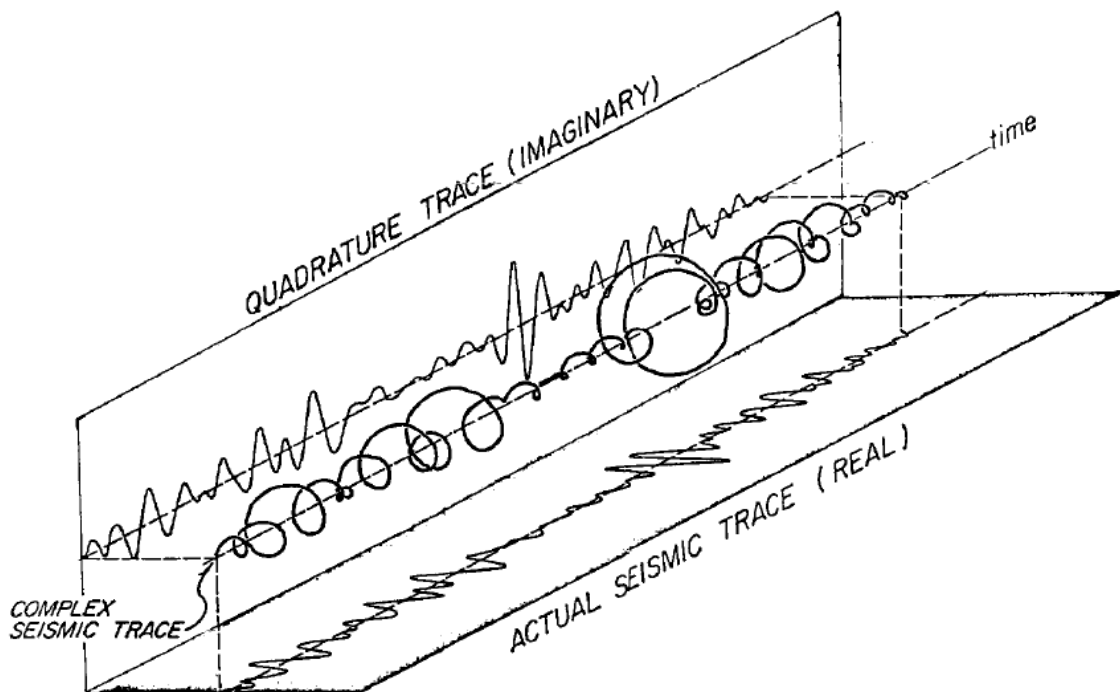


Figura 3.2 Diagrama de una porción de una traza sísmica, la cual nos muestra la parte real y en cuadratura de una traza sísmica (Taner, Khoeler, Sheriff, 1979).

### 3.3 Transformada de Hilbert

La transformada de Hilbert es un método que permite calcular la cuadratura, y es un rotador de fase, el cual permite restar  $90^\circ$  de la fase de una traza sísmica y así poder separar la información proporcionada por la amplitud de la que nos proporciona la fase (Barnes, 2007); en otras palabras, permite extraer la parte imaginaria de la traza compleja usando solo la parte real. Por esto es conocida como filtro en cuadratura y es un caso especial de la Transformada de Fourier.

Dado  $h(t)$  el cual es no singular y periódica en  $t=0$  y que es una respuesta de causalidad por lo que  $h(t)=0$  para  $t<0$ , entonces su transformada de Hilbert para la parte real a partir de la parte imaginaria es la siguiente:

$$g(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r(t)}{\tau-t} dt \quad (\text{ec. 3.2})$$

Mientras que su transformada inversa, su parte imaginaria a partir de la parte real es:

$$h(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\tau)}{\tau-t} dt \quad (\text{ec. 3.3})$$

Las cuales podemos utilizar para generar trazas de cuadratura de la traza real o viceversa por medio de la convolución (Taner, Koelher, Sheriff; 1979).

La transformada de Hilbert representa la convolución de  $h(t)$  con  $1/\pi\tau$ .

$$g(\tau) = h(t) * \frac{1}{\pi\tau} \quad (\text{ec. 3.4})$$

### 3.4 Resolución Lateral y Vertical

Uno de los problemas más importantes que se presentan en la sísmica es determinar los límites de resolución en los datos de reflexión; por esto la resolución juega un papel de gran importancia ya que ayuda a separar dos cuerpos que se encuentran muy juntos, sin que estos pierdan sus características individuales, y para lograr esto hay que solucionar dos aspectos distintos: primero hay que definir el grosor vertical y después definir la extensión lateral de nuestro cuerpo. Esto se hace mediante dos resoluciones las cuales son: Resolución lateral y vertical, donde la primera depende de la zona de Fresnel, mientras que la resolución vertical depende de la longitud de onda dominante (Yilmaz, 2001).

- **Resolución Vertical**

Esta resolución depende del espesor y de cierta forma ayuda a determinar el límite en el que se pueden separar dos reflectores, uno en la cima y otro en la base, sin que éstos pierdan sus características individuales. Como se menciono antes, depende de la longitud de onda dominante la cual está dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = v/f \quad (\text{ec. 3.5})$$

Donde  $v$  es la velocidad y  $f$  es la frecuencia dominante.

- **Resolución Lateral**

La resolución lateral se refiere a, qué tan cerca pueden estar dos reflectores sin que éstos pierdan sus características de forma horizontal y brinda la capacidad de poder distinguir pequeños detalles en las imágenes sísmicas. Ésta gira en torno a un fenómeno conocido como zona de Fresnel, del cual podemos definir su radio de la siguiente forma:

$$\frac{v}{2} \left[ \frac{t}{f} \right]^{1/2} \quad (\text{ec. 3.6})$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $v$  la velocidad y  $f$  la frecuencia.

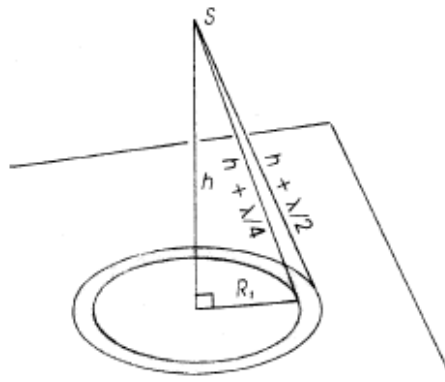


Figura 3.4 Zona de Fresnel para la fuente y el receptor coincidente en S, el primer radio de la zona de Fresnel es R1 (perpendicular a h). La segunda zona de Fresnel es el especial anular. La longitud de onda dominante es  $\lambda$ . (Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics, Sheriff 2002)

### 3.5 Clasificación de los atributos sísmicos

Los atributos sísmicos pueden ser calculados a través de datos antes de apilar o después de apilar, o antes o después de la migración en tiempo (Taner, 2001), ya que el procedimiento que se utiliza es el mismo en todos ellos. Como se mencionó anteriormente, la clasificación de los atributos varia conforme el autor, en este trabajo se utilizó la clasificación dada por Turhan Taner, la cual se basa en el análisis de traza compleja y sus características de dominio; también es necesario mencionar que muchos atributos sísmicos se parecen entre sí o son en esencia muy similares, por lo cual solo se mencionan los más representativos.

#### 3.5.1 Atributos de Traza Compleja

Estos atributos surgieron a partir de los trabajos de Taner y Sheriff en 1979, los cuales hablan sobre el beneficio de pensar en la traza sísmica como una señal analítica, de la cual solo se utiliza la parte real (Petrel 2007.1 Schlumberger, 2007). Se aplican a cada muestra de la traza sísmica, muestra por muestra y representa las variaciones instantáneas de diferentes parámetros (Taner, 2001).

##### 3.5.1.1 Coseno de la Fase

Este Atributo también es conocido como “Amplitud Normalizada”, en pantalla se puede apreciar que su escala de color es en blanco y negro, este atributo no contiene información de amplitud pues su escala de salida está entre los rangos de -1 a 1 (Schlumberger, 2007), dando un efecto de normalización ayudando a mejorar la continuidad del reflector así como mejorar la apariencia visual de los bordes, tales como fallas o límites estratigráficos.

Es un excelente indicador de continuidad lateral, terminaciones o límites estratigráficos, así como variaciones de facies sísmicas. Es comúnmente utilizado para aéreas pobremente resueltas en amplitud o para mejorar la definición estructural.

##### 3.5.1.2 Atributo Envolvente (Envelope)

Esta dada por:

$$A(t) = \sqrt{f^2(t) + f^{*2}(t)} = |F(t)| \quad (\text{ec. 3.7})$$

También es conocida como Amplitud envolvente o fuerza de reflexión (reflection strength) y es independiente de la fase. Esta puede tener su máximo en cualquier punto que no sea cresta o

valle de la traza real, especialmente cuando un evento es la combinación de una serie de reflexiones (Taner, Koehler, Sheriff; 1979), en otras palabras, varía entre cero y el máximo valor de amplitud de su traza.

Este criterio es de gran importancia pues ayuda a detectar puntos brillantes, los cuales están relacionados comúnmente con acumulaciones de gas, también es útil para la detección de los principales cambios litológicos, los cuales son causados por reflexiones de energía elevada. Este atributo también permite detectar con mayor facilidad los límites de secuencia o los cambios de fase entre los datos sísmicos (Schlumberger, 2007).

También es sensible a cambios de impedancia acústica y como consecuencia a la litología, a la porosidad, a los hidrocarburos y a los efectos de capas delgadas. Así mismo ayuda a distinguir mejor los cambios laterales que indican cierto fallamiento.

### 3.5.1.3 Frecuencia Instantánea

La frecuencia instantánea depende de los valores de fase, definida por:

$$\frac{d\gamma(t)}{dt} = \omega(t) \quad (\text{ec. 3.8})$$

La frecuencia instantánea es un valor asociado con un punto en el tiempo como la fase instantánea (Taner, Koehler, Sheriff; 1979). La frecuencia instantánea es independiente de la fase y de la amplitud, que es útil ya que este atributo tiene una resolución aparentemente superior a la de los datos de entrada. Ayuda en la identificación de la atenuación anómala y en los cambios de espesor de cama delgada (thin bed tuning).

Este atributo nos es útil especialmente para:

- Detección de zonas de fractura.
- Cambios de espesor.
- Cambios en la litología de forma lateral.
- Detección de propiedades de la roca.

### 3.5.1.4 Fase Instantánea

Es un valor asociado a un punto en el tiempo y por lo tanto, es muy diferente de la fase como una función de la frecuencia (Taner, Koehler, Sheriff; 1979). Muestra la continuidad de un evento además de ser un buen indicador de continuidad lateral.

Está definida por la siguiente ecuación:

$$\Theta(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{g}{f} \right] \quad (\text{ec. 3.9})$$

Este atributo se utiliza principalmente para:

- Calcular la velocidad de fase.
- Como buen indicador de continuidades, fallas así como eventos con distintos echados.
- Para tener una visualización aun más detallada de los elementos estratigráficos.
- Límites de secuencias.

### 3.5.1.5 Caos

Se calcula mediante la desviación estándar de echados y con la semblanza lateral:

$$\text{Chaotic}(t) = \sigma(t) \text{ Semb}(t) \quad (\text{ec.3.10})$$

Este atributo ayuda como detector de zonas de chimeneas de gas, texturas de arrecifes, cenotes, rellenos de canales, fallas y discontinuidades. Éste puede ser afectado por intrusiones de cuerpos salinos, por texturas caóticas o por trayectorias de migración de gas.

## 3. 6 Sísmica de Reflexión

Este método se utiliza en el ámbito petrolero, pues ofrece grandes ventajas con respecto al método de refracción, aparte de ser uno de los métodos con mayor resolución dentro de los métodos geofísicos, ya que con él se obtienen buenos resultados tanto, en zonas someras como en zonas más profundas.

Esta técnica se basa en la ley de Snell, y proporciona información sobre las trayectorias de los rayos, posición de refractores así como sus tiempos de llegada, y establece:

$$\text{sen } i = \text{sen } r \quad (\text{ec. 3.11})$$

Esto ocurre cuando un frente de onda llega a hacer contacto entre dos capas de diferentes velocidades y densidades; el ángulo con el que incide la energía de la onda es reflejado propagándose en el medio, esto ocurrirá siempre y cuando exista un contraste de velocidades en el contacto (Figura 3.3).

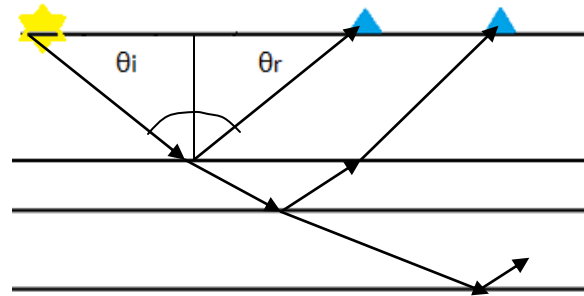


Figura 3.3 Principio de Reflexión.

Para esto se necesita una fuente emisora y un receptor, el tipo de fuente emisora a utilizar en este método depende si el estudio es en tierra o en mar. En tierra, por ejemplo se pueden llegar a utilizar explosivos o *camiones vibroseis*. Los receptores son mejor conocidos como sismo detectores y son los que recogen las señales reflejadas; estas señales se llaman trazas sísmicas las cuales son procesadas y reordenadas en puntos reflectores comunes (CDP), después son sumadas para así obtener solo una traza de punto común; estas se juntan y con ellas se obtienen una sección sísmica, la cual es una imagen del subsuelo.



## Capítulo 4 Adquisición y Procesado

### 4.1 Adquisición Marina

La forma de adquirir los datos sísmicos en mar es mediante un barco; éste se realiza a través de hidrófonos y una fuente sísmica. Generalmente la pistola de aire es la fuente sísmica más utilizada en este tipo de adquisiciones por tener una muy buena respuesta en este medio, consiste en una cámara de aire que se llena a una gran presión de aproximadamente 2000 a 5000 psi. Los hidrófonos se colocan en un aparato conocido como *streamer*, el cual es una especie de cable que puede medir entre 3 a 5 km, el cual es remolcado aproximadamente a 15 metros de profundidad y a lo largo de la zona de estudio, puede contar con distinta capacidad de hidrófonos.

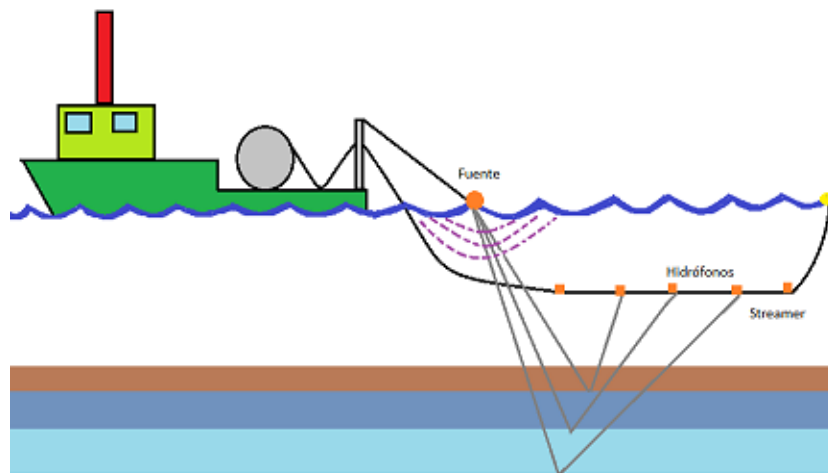


Figura 4.1 Diagrama en el que se muestra como se realiza una adquisición marina de perfiles sísmicos.



Figura 4.2 Streamer (Fotos tomadas durante la adquisición de perfiles sísmicos durante la Campaña del 2005 en el Cráter Chicxulub).

### 4.1.2 Campaña del 2005

Durante la campaña de 2005, la Universidad de Texas en Austin UTIG, la Universidad de Cambridge, el Imperial College así como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), llevaron a cabo un proyecto en el cual se obtuvieron 29 perfiles sísmicos con diferentes orientaciones (Figura 4.4). Esto se realizó por medio de un tendido de 6 km de largo con 480 canales espaciados cada 12.5 m, con intervalos de muestreo de 2 ms.

Esta campaña tuvo 4 objetivos principales los cuales fueron:

1. Determinar la dirección de enfoque y el Angulo de impacto del Chicxulub.
2. Mapear la deformación que éste dejó en la corteza superior cerca del centro del cráter.
3. Permitir una mejor comprensión de la estructura del cráter en su porción noreste.
4. Realizar un modelado en 3-D de la estructura de impacto del cráter.

Para este trabajo solo se utilizaron 5 de perfiles, los cuales son: Chix13B, Chix16, Chix23, Chix23-A y Chix24 (Figura 4.3 y Figura 4.4).

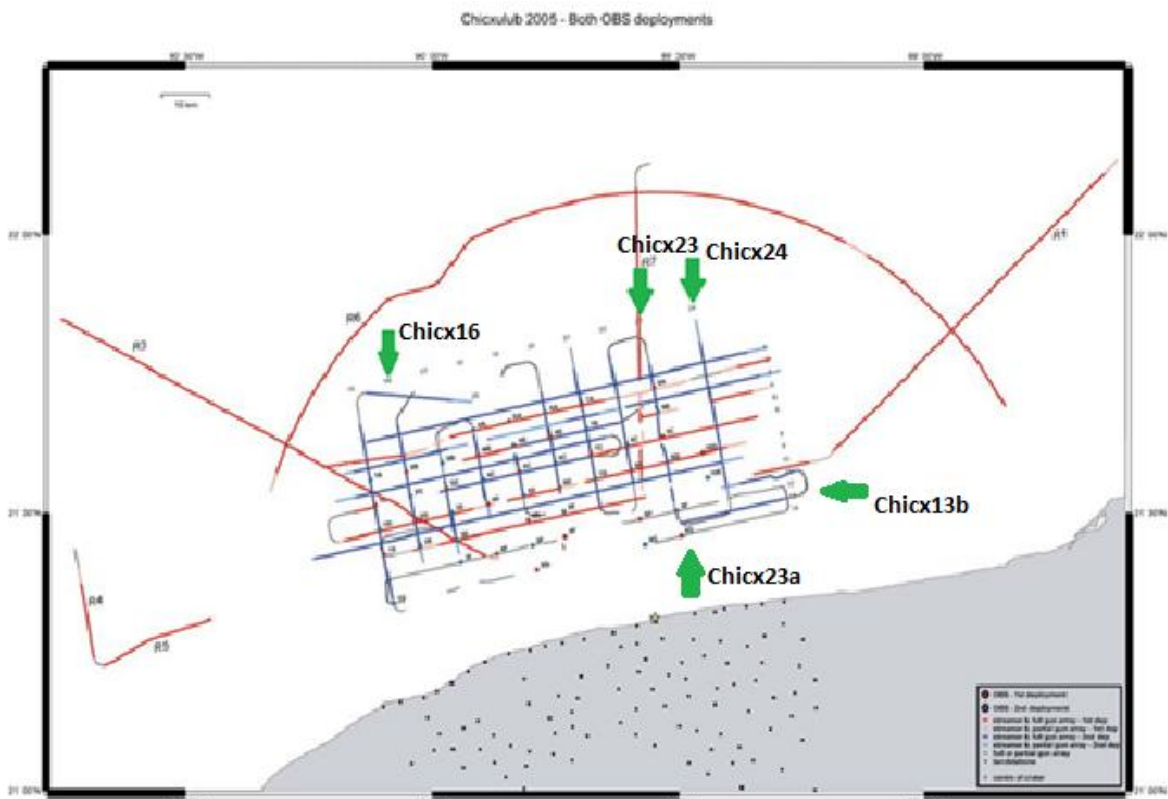


Figura 4.3 Se muestra la ubicación de los perfiles sísmicos que se han realizado en el cráter Chicxulub, las flechas verdes corresponden a los perfiles utilizados, en orden de izquierda a derecha Chix16, Chix23 y Chix24, en la parte de abajo se encuentra Chix23a y Chix13b (Modificada de J. Urrutia et al ; 2005 ).

En la tabla 1 se muestra la ubicación de las líneas:

Línea	Longitud	Ubicación	Distancia al centro del Cráter
<b>Chicx13b</b>	22 km	21° 28' 54" N, 89 29' 39" W	20 km
		21° 31' 33" N, 89 17' 05" W	37 km
<b>Chicx16</b>	28 km	21° 39' 32" N, 90 04' 30" W	66 km
		21° 24' 40" N, 90 01' 05" W	48 km
<b>Chicx23</b>	11 km	21° 45' 59" N, 89 33' 34" W	50 km
		21° 40' 22" N, 89 32' 23" W	40 km
<b>Chicx23a</b>	18 km	21° 31' 40" N, 89 25' 02" W	25 km
		21° 40' 59" N, 89 32' 36" W	42 km
<b>Chicx24</b>	25 km	21° 50' 53" N, 89 27' 48" W	61 km
		21° 37' 40" N, 89 25' 02" W	38 km

Tabla 1. Muestra la ubicación de las líneas así como la distancia de cada uno de ellas respecto al centro del cráter y su longitud aproximada de cada una de ellas, su ubicación fue tomada de la página <http://www.ig.utexas.edu> donde se encuentra el reporte de la campaña.

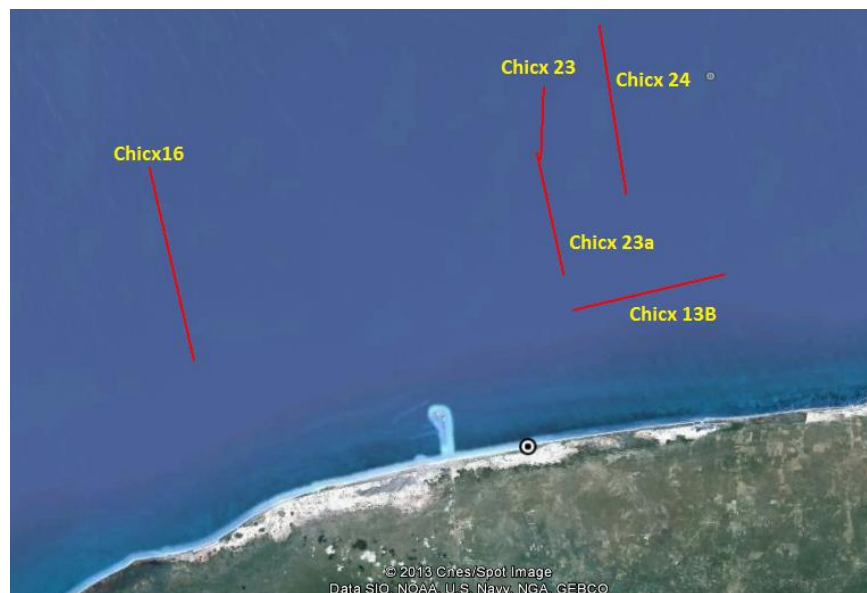


Figura 4.4 Se muestra la ubicación solo de las líneas Chicx16, Chicx23, Chicx23a, Chicx24 y Chicx13, así como su longitud, el círculo blanco indica el centro del cráter (Google Earth 2013).

También se muestra la ubicación de los perfiles sísmicos utilizados con respecto a la Anomalía Gravimétrica, esta imagen se utilizará para futuras referencias en el Capítulo 5(Figura 4.5).

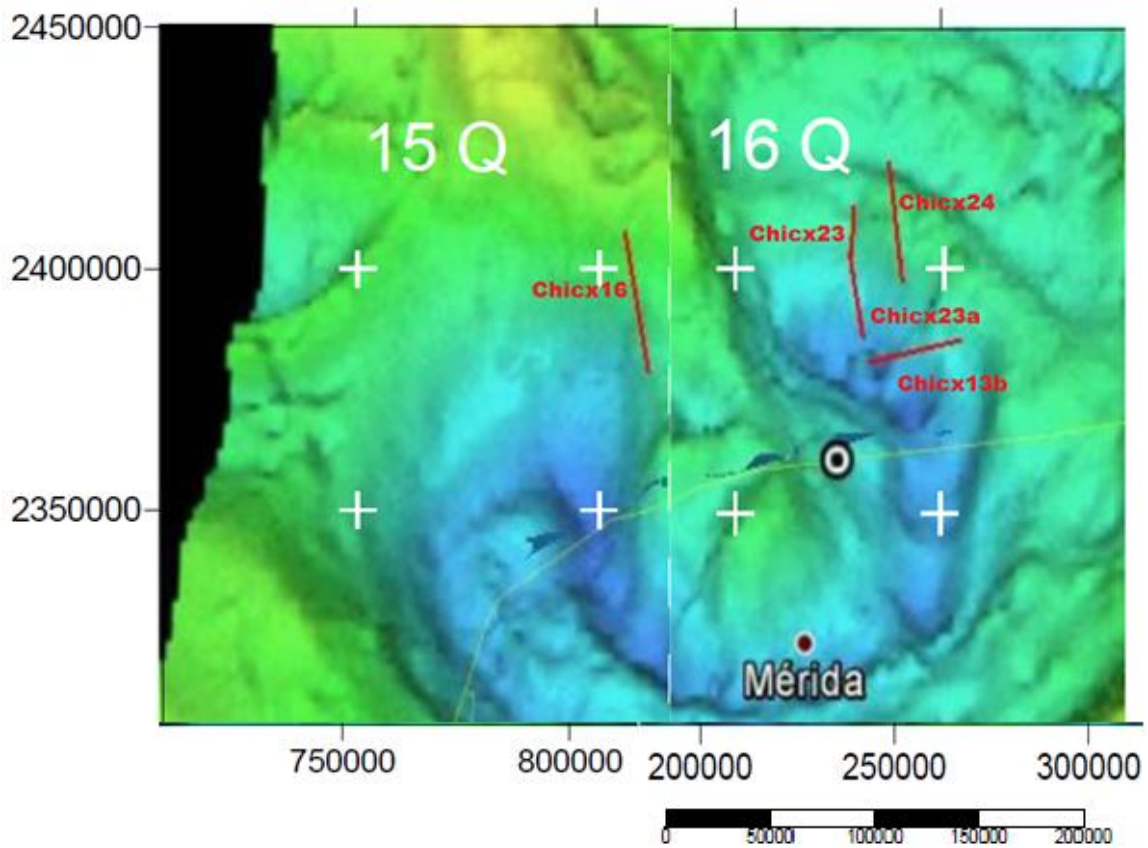


Figura 4.5 Muestra la ubicación de las líneas Chicx13b, Chicx16, Chicx23, Chicx23a, Chicx24, sobre puesta a la anomalía gravimétrica de Bouguer del Cráter Chicxulub (Modificado Urrutia et al 2010).

En la tabla 2 se muestra cuales fueron los parámetros de adquisición para dicha campaña, la cual se encuentra en la página del proyecto:

Source volume	6947 in <sup>3</sup>	Receiver type	Hydrophone Streamer
Source pressure	138 bars	Source type	AirGun: Bolt 1500
Source number	20	Number of channels recorded	480
Source depth	6 +/- m	Sample interval	2 000microseconds
Channels length	12.5m	Record length	14 s
Processing system	Paradigm Geophysical Focus 5	Acquisition system name	Syntrak
Shot control	50m	Distance	

Tabla 2. Parámetros de adquisición de la campaña, tomados de la página <http://www.ig.utexas.edu/sdc/> donde se encuentra el proyecto.



Figura 4.4 Fotos que fueron tomadas durante la adquisición de los datos marinos de la campaña del 2005.

## 4.2 Procesado

El procesado de los datos sísmicos generalmente se lleva a cabo para mejorar la relación entre la señal y el ruido y con esto, facilitar la interpretación de los datos.

Las etapas en orden para el procesado de datos sísmicos se basa en:

1. Deconvolución.
2. Apilamiento.
3. Migración.

En cada una de estas etapas intervienen una serie de tratamientos fijos, mientras que hay otros algoritmos que se pueden aplicar en cualquier momento del procesado (filtrado, escalado de amplitud, etc.).

La secuencia Básica del Procesado se muestra en la figura 4.5:

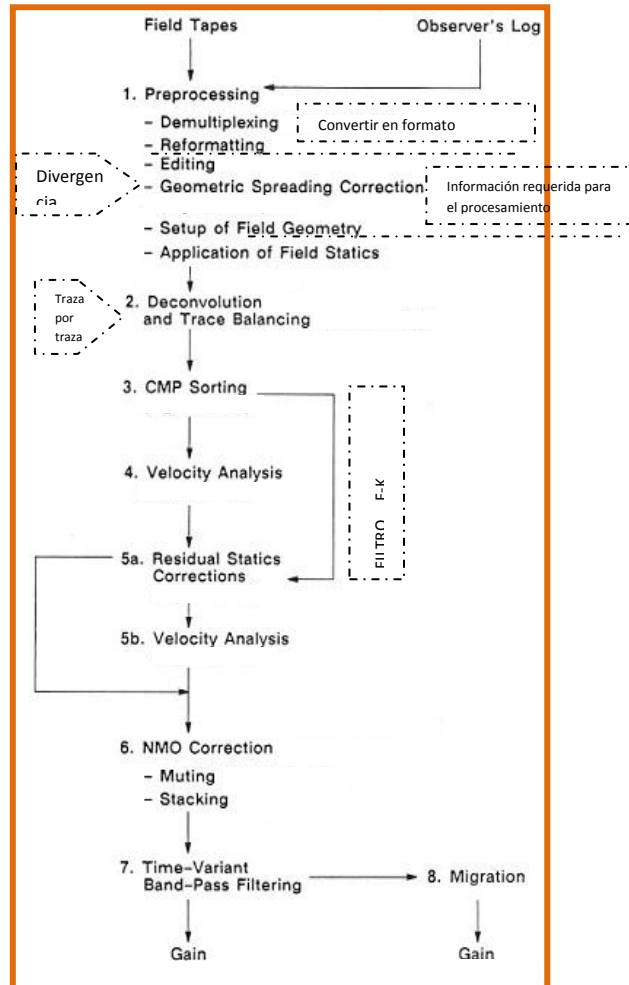


Figura 4.5 Secuencia básica de procesado (Modificada Yilmaz, 2001).

### 1. Pre-procesado

Demultiplexado: Consiste en almacenar los datos en columnas de muestra según su tiempo. Matemáticamente los datos se ven como una matriz transpuesta donde las columnas de la matriz resultante se pueden leer como las trazas sísmicas a diferentes offsets con un punto de tiro común (Yilmaz, 2001). Esto es necesario para el procesado porque se necesita que los datos estén ordenados según su punto de tiro.

Reformateo: Generalmente los datos son registrados en campo con un intervalo de muestreo de 2 ms. Para reducir el tiempo y costo del procesado de los datos, es necesario remuestrearlos a 4 ms (Tesis Maestría Francisco, 2011).

Editado: En este paso se borran aquellas trazas que contienen ruido o que contienen señales de mono frecuencias y se corrigen las polaridades invertidas.

Compensación por divergencia esférica: Depende del tiempo de viaje y de una aproximación primaria de la función de velocidad, la cual se asocian a las reflexiones primarias del área de estudio (limpia las trazas muertas). Para compensar la pérdida de energía es necesario aplicar una función exponencial (Yilmaz, 2001).

Configuración de la geometría del campo- Se basa en la información de campo, ya que con ella se coloca la información correcta de las coordenadas de los receptores y de la fuente en la parte superior de las trazas.

Aplicación de la estática de campo- Esta se aplica exclusivamente para los datos obtenidos en tierra, y consiste en mover los tiempos de viaje a un nivel de referencia, el cual puede ser fijo o flotante ( varíe a lo largo de la línea).

### 2. Deconvolución y Balance de Trazas

Generalmente la deconvolución se aplica antes del apilado y se hace traza por traza, convencionalmente utiliza el filtro óptimo de Wiener. Existen dos tipos de deconvolución: la impulsiva y la predictiva, la impulsiva se utiliza para mejorar la resolución temporal al comprimir la ondícula aproximadamente a un impulso (mientras más amplias las ondículas, las altas frecuencias se pierden por atenuación). Mientras que la deconvolución predictiva es comúnmente utilizada para la eliminación de reflexiones múltiples (aún después del apilado) y no altera a la ondícula. Además de esto hay que aplicar un tipo de balance de trazas para llevarlas a un nivel común rms (Yilmaz, 2001).

### 3. CMP

Después de procesar la señal inicial, los datos se transforman de un punto receptor a coordenadas de punto medio común (CMP); el CMP requiere de la información de la geometría de campo. El apilamiento de Punto Medio Común, atenúa el ruido coherente, como múltiples, ondas guiadas y ondas ground roll, porque la señal reflejada y el ruido coherente tienen diferentes velocidades en el apilado.

### 4. Análisis de Velocidades

El análisis de velocidad se da en los CMP gathers, y sus datos de salida son una tabla en función de velocidad contra 2 veces el tiempo de offset cero (espectro de velocidad). Estos números representan la medición de la señal a lo largo de trayectorias hiperbólicas, las cuales dependen de la velocidad, offset y el tiempo de viaje (Yilmaz, 2001).

### 5. Corrección por NMO y Apilado

La corrección NMO se le llama también corrección dinámica o corrección por sobretiempo normal, y trata de que las amplitudes queden en un mismo plano; se le llama dinámica, porque la magnitud depende del tiempo y consiste en estirar la traza, a poca profundidad se estira más que mayor profundidad. En el apilamiento o *Stacking* se suman todas las trazas y ayuda a mejorar la relación entre la señal y el ruido.

### 6. Corrección Estática Residual

Esta se realiza para los eventos los cuales no pueden ser totalmente planos después de aplicarles una corrección NMO, y consiste en llevar todas las trazas a un nivel de referencia.

### 7. Procesado después del Apilado

Es usada para la eliminación de las bandas de frecuencias ruidosas a través de la aplicación de un filtro pasa-bandas variante en el tiempo.

### 8. Migración

Se aplica a la sección apilada (una sección con offset cero). El objetivo de la migración es eliminar difracciones para incrementar la resolución lateral y colocar los eventos con echados en su posición real.

La ganancia es aplicada a datos sísmicos que están por desplegarse con el fin de corregir los efectos de amplitud de la divergencia del frente de onda. Una aplicación de ganancia es la corrección por dispersión esférica.



### 4.2.1 Procesado de las Líneas

El procesado general de los datos utilizados en este trabajo consistió en:

- Editado de los *shot gathers* para eliminar el ruido de los datos e incrementar la razón señal-ruido (SNR) final.
- Borrado (*Mute*), picado de velocidades y apilamiento.
- Deconvolución.
- Blanqueado Espectral.
- También se le aplico un filtro pasa banda trapezoidal que pasó de las frecuencias 3-75 Hz a 0 segundos y de 8-100 Hz a 14.366 segundos, acoplado con un filtro FK, después del apilado se aplicó una migración en tiempo de Kirchoff.

### 4.3 Petrel

Es una herramienta que fue desarrollada y distribuida por la empresa Schlumberger, la cual es utilizada en la rama del petróleo tanto para geología como para geofísica, también es utilizada por petroleros para el diseño y optimización de pozos; en general, permite el desarrollo de flujos de trabajo y para agilizar algunos procesos.

Petrel en su parte geofísica, entre otras, nos permite:

- Interpretar y Visualizar datos sísmicos en 2D y 3D.
- Generar y analizar los atributos sísmicos para la mejora de información que en algún momento puede ser sutil con la sísmica tradicional y con esto poder obtener una mejor interpretación de los datos.
- La conversión rápida de dominio entre el tiempo y la profundidad, así como la creación de los modelos de velocidad.
- Reducir la brecha entre el dominio del tiempo y la profundidad (sismogramas sintéticos).
- Estimar los registros de pozos, superficies y volúmenes sísmicos mediante redes neuronales.

## Capítulo 5. Análisis de Resultados y Discusión

### 5.1 Resultados

Los perfiles sísmicos que se utilizaron para este trabajo fueron analizados con la aplicación de los distintos atributos sísmicos que se encuentran predeterminados en Petrel; además en éste, existen distintos tipos de Atributos los cuales están divididos por categorías, algunas de ellas son: Atributos Básicos, Atributos Complejos, Métodos Estructurales, entre otros.

#### 5.1.1 Líneas Sísmicas

A continuación se presentan las líneas sísmicas utilizadas en este trabajo ( figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5), las cuales no están modificadas aun, es decir, están en su forma original pues no se les ha aplicado atributo sísmico alguno, esto con el fin de que al aplicarle los atributos sísmicos podamos ver las diferencias.

- **Línea Chicx23A**

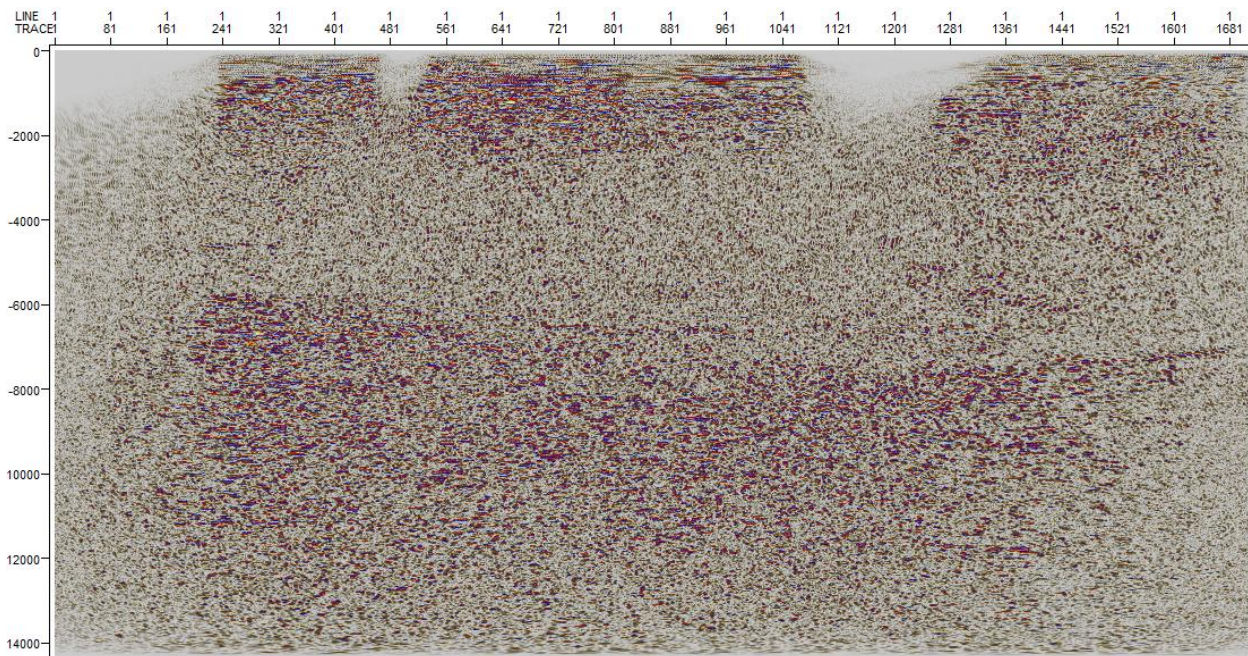


Figura 5.1 Muestra a la línea Chicx23A sin modificar.

- **Línea Chicx23**

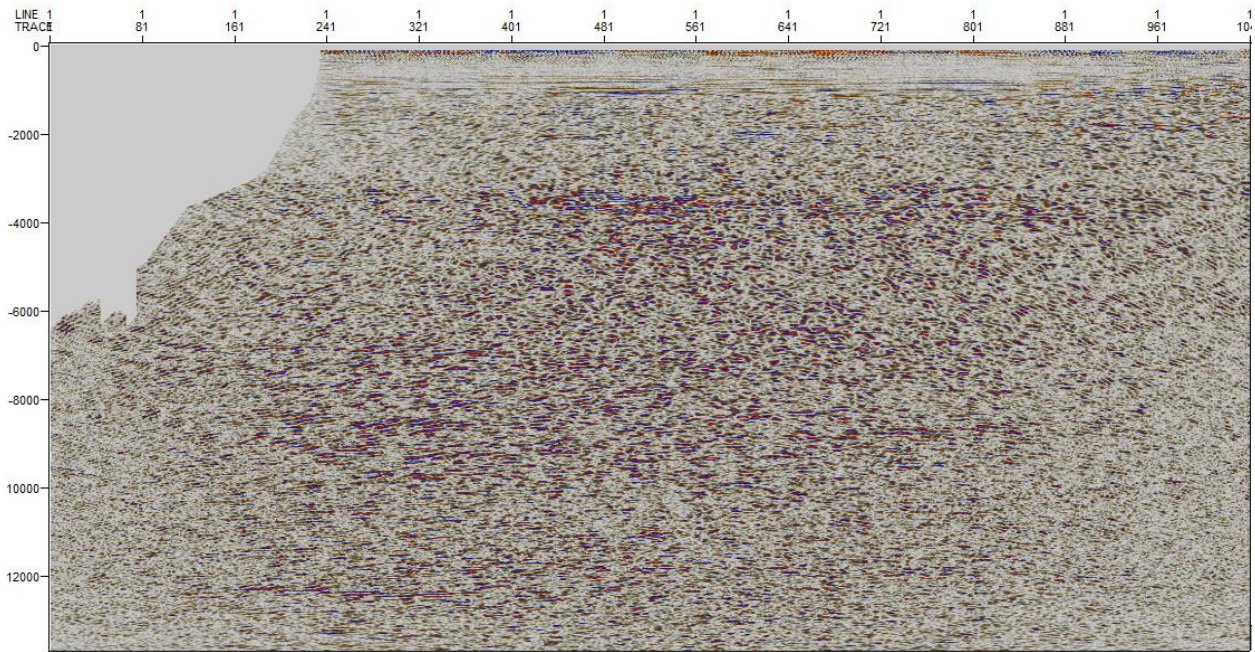


Figura 5.2 Muestra a la línea Chicx23 sin modificar.

- **Línea Chicx24**

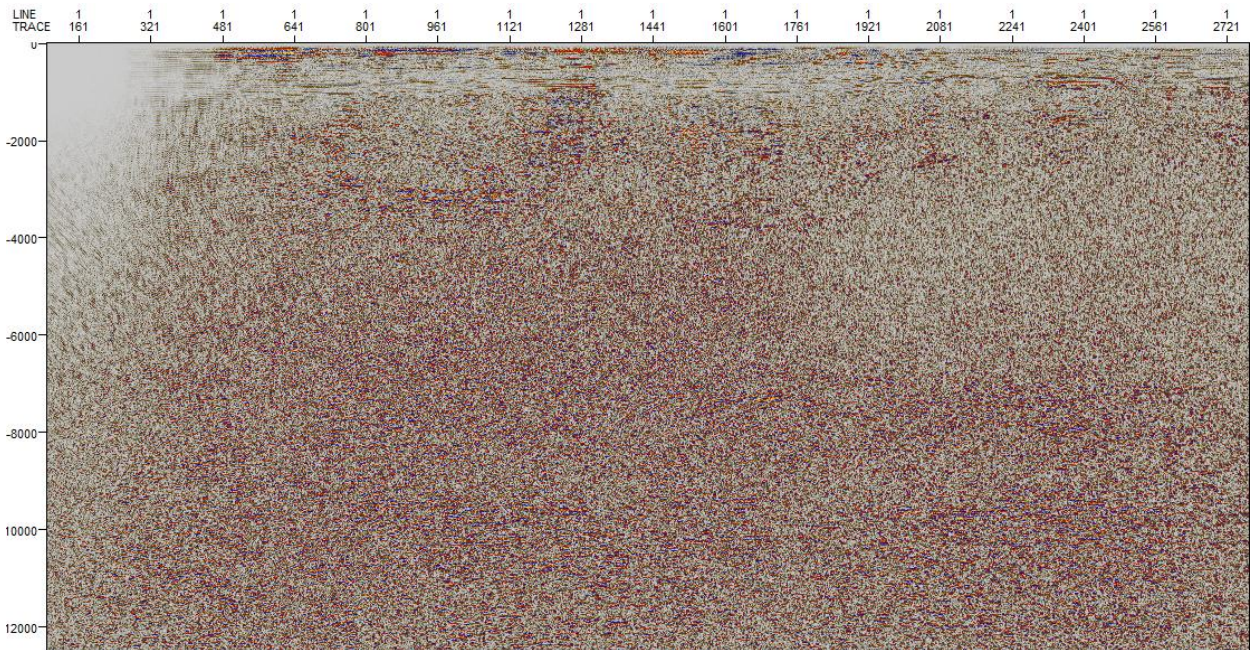


Figura 5.3 Muestra a la línea Chicx24 sin modificar.

- **Chicx13b**

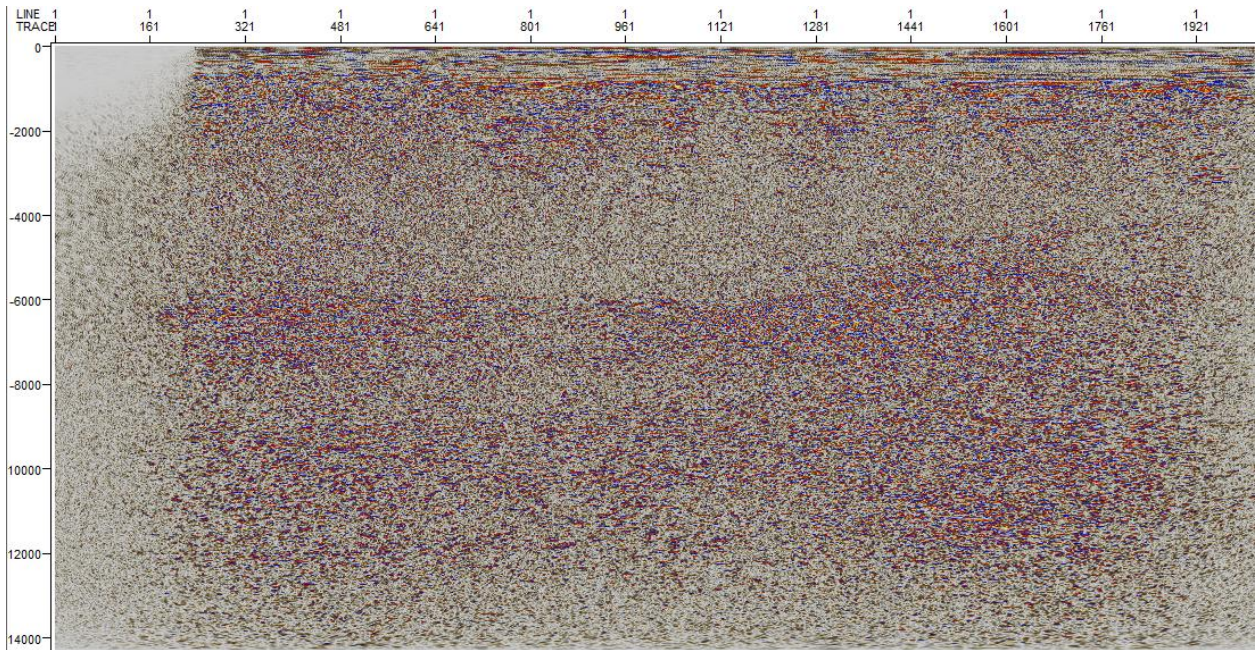


Figura 5.4 Muestra a la línea Chicx13b sin modificar.

- **Chicx16**

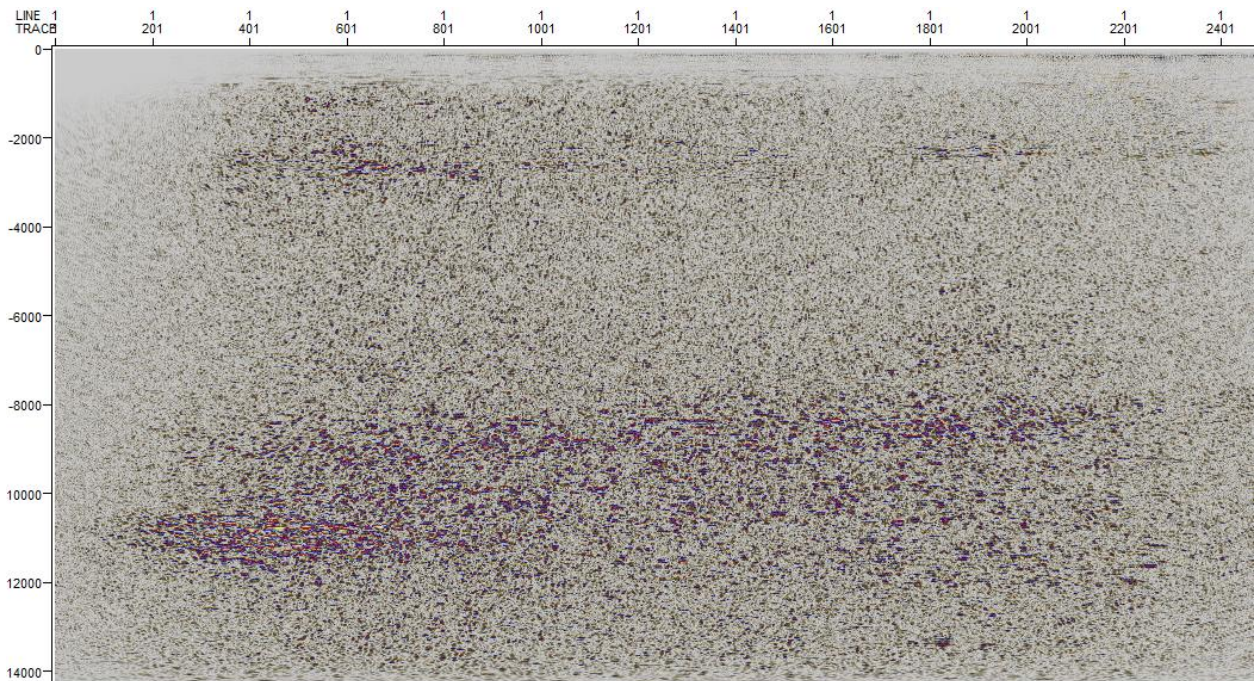


Figura 5.5 Muestra a la línea Chicx16 sin modificar.

## 5.2 Suavizado Estructural

En las imágenes anteriores es difícil definir directamente los distintos paquetes litológicos que la conforman, para esto, a estos mismos perfiles en su forma original se les aplicó un suavizado estructural el cual es un atributo que sirve para reducir el ruido en los perfiles sísmicos, con el fin de resaltar mejor los eventos o estructuras que se requieren destacar en los perfiles sísmicos.

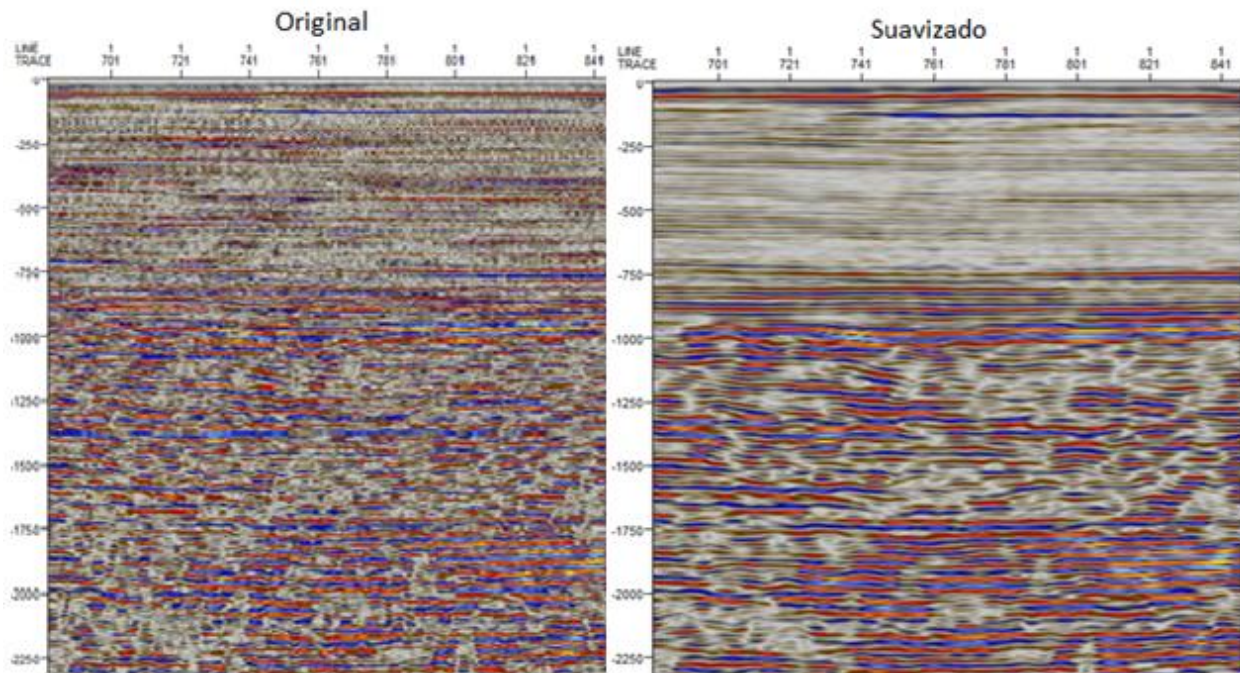


Figura 5.6 Intervalo de la línea Chicx13b que comprende la traza 701 a la traza 841, que muestra a la traza después de aplicar el suavizado estructural.

La imagen es un fragmento de la línea Chicx13b, en el cual se puede apreciar, cómo al aplicarle el suavizado a la imagen sísmica ésta la mejora de forma muy notoria haciendo que los eventos estén mejor definidos (Figura 5.6), lo cual permite seguir con mayor exactitud la continuidad de los reflectores; esto se debe a que el suavizado funciona como un tipo de filtro impidiendo el paso de las frecuencias altas; como se muestra a continuación en el Fragmento de Línea Chicx16 que comprende la traza 381 hasta la 601 (Figura 5.7); en amarillo se muestra la continuidad de los reflectores:

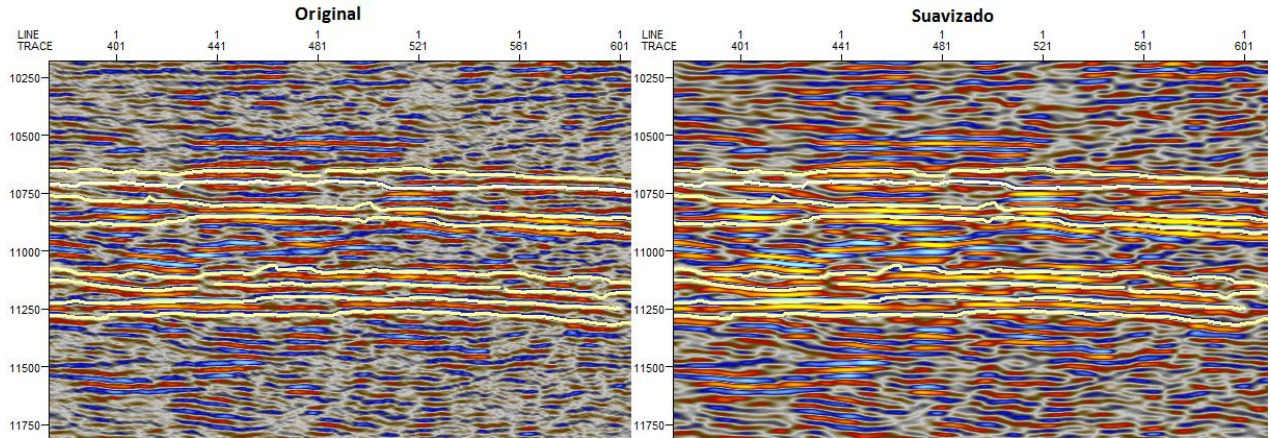
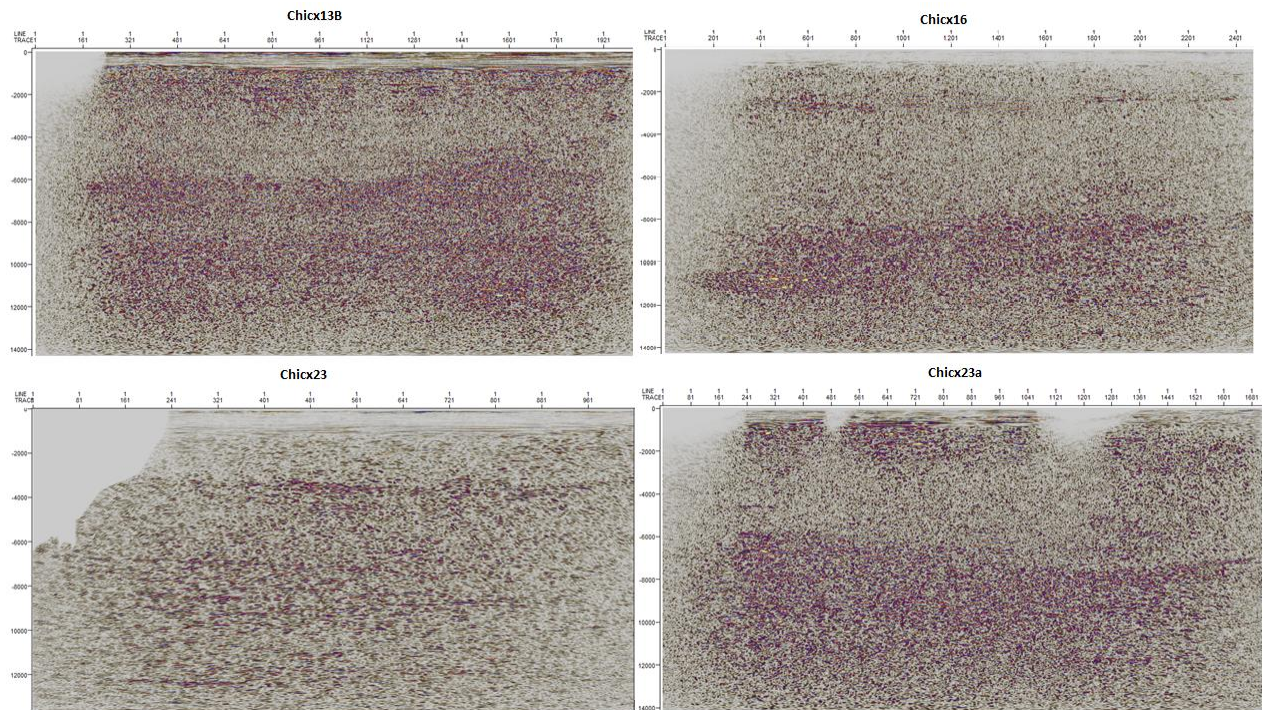


Figura 5.7 Fragmento línea Chicx16, de la traza 381 a la 601, en la cual se pueden apreciar en amarillo los reflectores mejor definidos después de aplicarle el suavizado estructural.

A continuación en la Figura 5.8, se muestra las líneas sísmicas a las cuales ya se les ha aplicado el suavizado estructural:



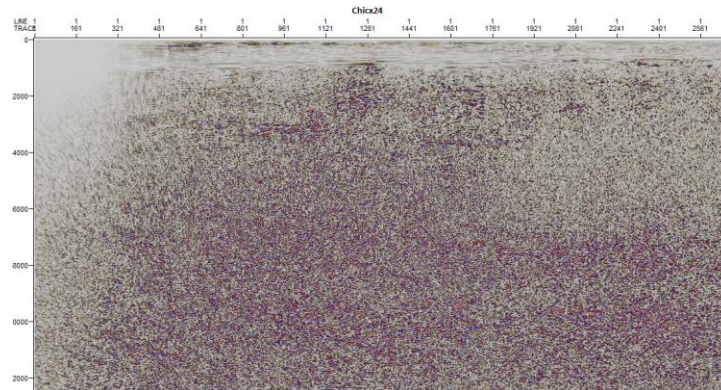


Figura 5.8 Líneas sísmicas: Chicx13b, Chicx16, Chicx23, Chicx23A y Chicx24 en orden de izquierda a derecha, a las cuales ya se les ha aplicado el Suavizado Estructural.

Las líneas Chicx24, Chicx16 y la Chicx23 muestran un cambio más notorio con respecto a las imágenes originales, ya que se definen mejor sus paquetes litológicos, contrario a las imágenes originales en las que solo se podía identificar un horizonte; en la línea Chicx24 se pueden delimitar 3 horizontes, así como, en las líneas Chicx16 y Chicx23, donde a simple vista existen también 3 horizontes en ellas.

Una vez aplicado el suavizado estructural, el siguiente paso fue aplicarle los distintos atributos sísmicos antes mencionados, a las imágenes, con el fin de poder marcar los distintos paquetes que los conforman utilizando los atributos de coseno de la fase, atributo envolvente, fase instantánea y caos, ya que éstos por sus características, facilitan más la separación de las distintas texturas que los paquetes presentan.

Se separan los distintos paquetes mediante los atributos de coseno de la fase y fase instantánea, siguiendo los eventos más continuos, ya que, estos atributos por sus características permiten ver los estratos continuos de una manera más fácil tomando en cuenta el cambio de texturas, ya que ésta puede ser un indicador de un cambio en la litología. Estos atributos son controvertidos en el medio, ya que son muy similares, pues ambos ayudan en esencia a lo mismo, pero lo que los hace diferentes es la escala de colores que ambos presentan; por lo tanto, el intérprete puede elegir la escala de color que le sea más cómodo (Figura 5.9). ]

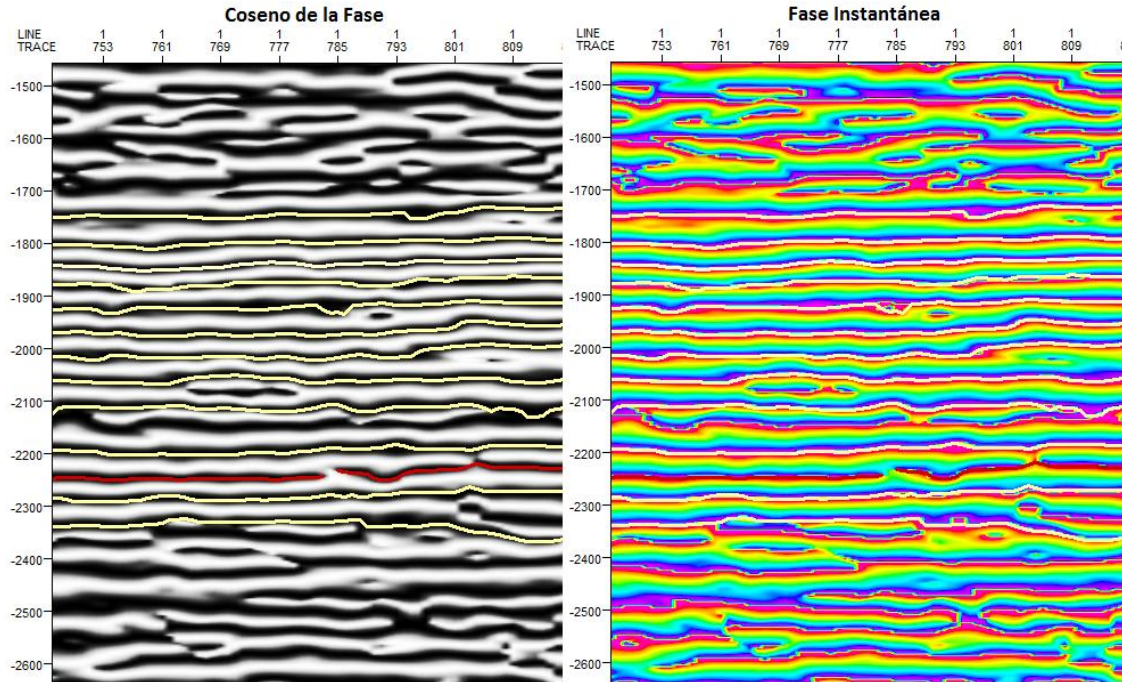


Figura 5.9 Coseno de la Fase vs Fase Instantánea, en amarillo destacan los estratos continuos, y en rojo se presenta un estrato fracturado.

Posteriormente se utilizó el atributo de caos y el envolvente para poder separar mejor las texturas, ya que éstos muestran con mayor claridad los cambios en los perfiles. Es decir, al aplicar el atributo de caos, éste presenta una escala de colores en amarillos y blancos, donde las partes más blancas que se obtienen después de aplicar este atributo, indican que existe mayor continuidad en los eventos ahí presentes; mientras que las zonas amarillas, indican la presencia de mayor fracturamiento, lo cual ayuda a definir las distintas litologías que se encuentran en la imagen sísmica. En forma muy similar funciona el atributo envolvente, ya que, mediante su contraste de impedancias, se separan dos tonalidades dominantes en su escala de color, un azul mas fuerte relacionado con las impedancias más altas y un azul más tenue con impedancias más bajas; este atributo también tiene como característica mostrar los puntos brillantes presentes en la imagen.



### 5.3 Interpretación

- **Chicx13b**

En las imágenes los atributos de Caos y Envolvente de Amplitud, se pudieron localizar 5 paquetes; el primer paquete se encuentra entre 0 *ms* profundidad hasta aproximadamente 800 *ms*; el cual marca la línea del Paleógeno, en el destaca un depósito continuo en capas horizontales; además se aprecia que en la imagen con el atributo de Caos en su mayoría se encuentra en color blanco y esto indica la continuidad lateral de sus estratos; el segundo paquete se encuentra a una profundidad entre 800 *ms* a 1700 *ms*; se aprecia en su amplitud que cambia notoriamente respecto al Paleógeno, ya que ésta es mayor, además de que se encuentra con un mayor fracturamiento, pero aun encontrando indicios de una continuidad en sus eventos. En el Paquete tres, de los 2100 *ms* a los 6000 *ms* de profundidad, se puede ver que es una zona de baja amplitud, como se confirma con el atributo de Caos, recordando que éste muestra en color naranja, las zonas con mayor fracturamiento. El paquete cuatro se encuentra de 5700 *ms* hasta los 9000 *ms* y, en la imagen se observa con el atributo envolvente, zonas que tienen amplitudes altas, las cuales se presentan como puntos brillantes; recordando que este atributo, en especial, ayuda a destacar los puntos brillantes como posibles acumulaciones de gas; aunque en estas zonas, eso no es posible por lo que, éstos puntos brillantes se atribuyen a las zonas que muestran una mejor continuidad lateral de sus eventos. A partir de los 8000 *ms* la amplitud comienza a cambiar mostrando una zona de bajas amplitudes, marcado como un horizonte en color rosa en el Horizonte 4 el cual comienza a los 9000 *ms* de profundidad; este horizonte se nota un poco antes de la traza 1441 que comienza a tener una amplitud semejante al horizonte superior, por este motivo, no se puede continuar este horizonte al final de la imagen; lo cual, indicaría que este horizonte podría ser un solo paquete, pues comparte características muy similares, suponiéndose que es todo un paquete y que la parte de bajas amplitudes que se deben a la posible migración de evaporitas provenientes de zonas de Campeche y Tabasco, las cuales están impidiendo el paso de la onda en esta parte de la imagen (Figura 5.10).

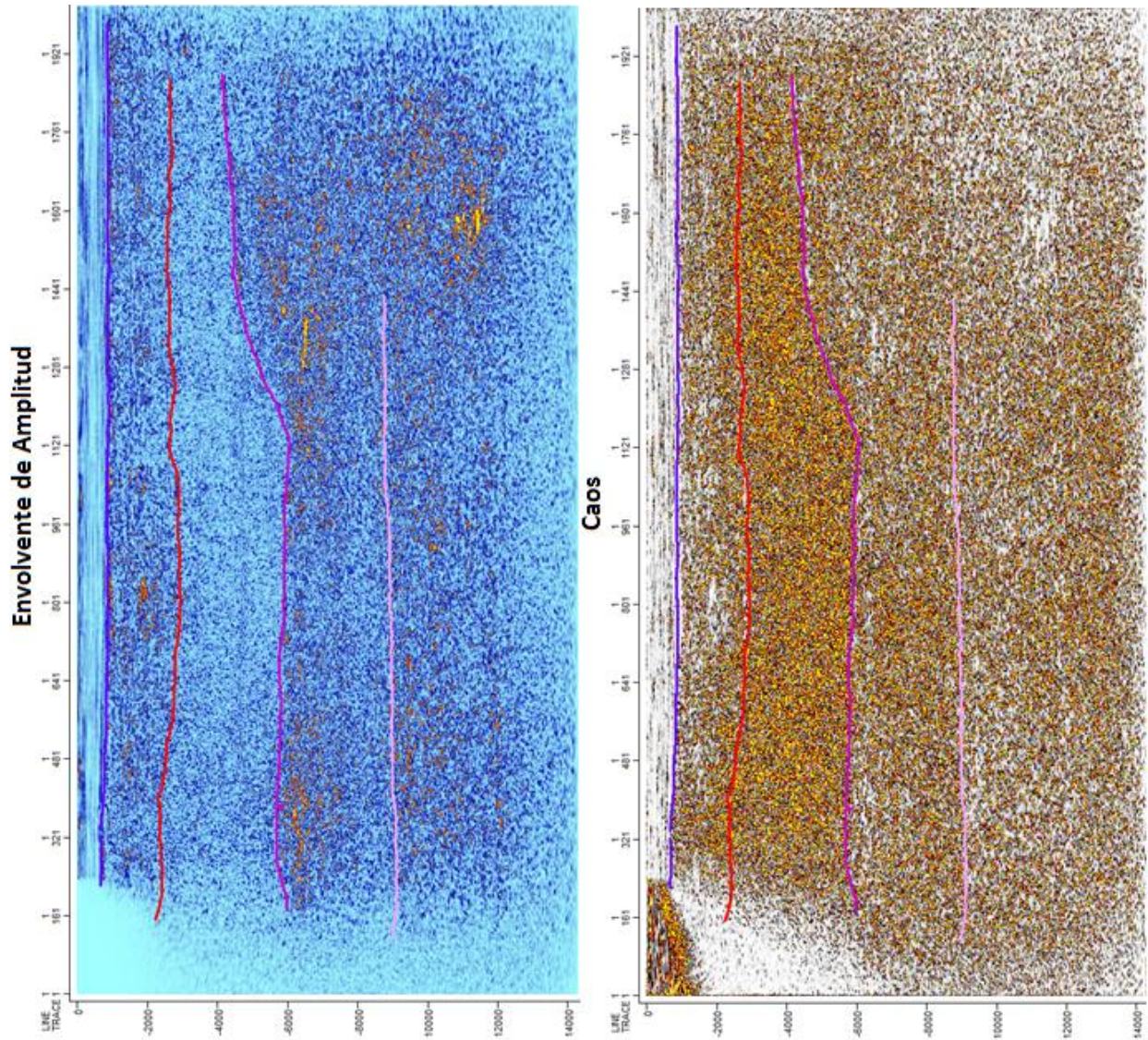


Figura 5.10 Muestra en color violeta el Horizonte 1, en rojo el Horizonte 2, en color morado el Horizonte 3 y en rosa el Horizonte 4. A la derecha se encuentra el atributo de caos y a la izquierda el atributo Envolvente de Amplitud.

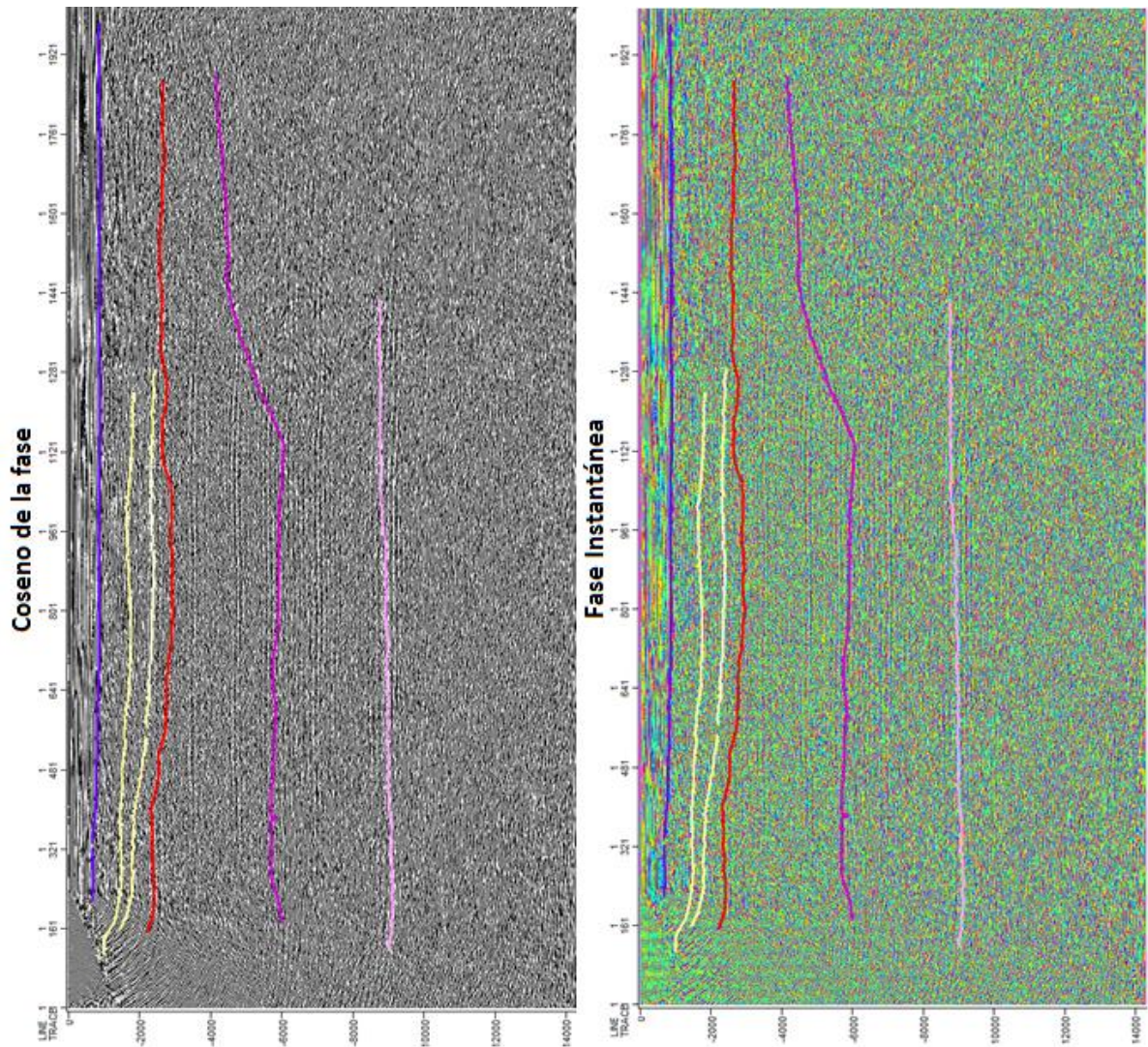


Figura 5.11 Muestra la Línea Chicx13b con los atributos de coseno de la fase y fase instantánea, donde se marcan los distintos horizontes, y en color amarillo se marca una estructura de tipo clinoforme.

La Figura 5.11 muestra a la línea 13b, la cual es paralela a la línea de costa, además de ser la más cercana al centro del cráter; en ella se puede observar dentro del segundo horizonte en color amarillo; la evidencia de una estructura de tipo clinoforme es causada por el depósito de los sedimentos; este tipo de estructuras normalmente se podrían visualizar mediante un perfil sísmico de forma perpendicular a la línea de costa, y no se descarta que este tipo de estructuras también se constituyan de esta forma. En el tercer horizonte señalado en color morado, fue marcado con los atributos de Caos y Envolvente de Amplitud, y que se puede verificar que éste tiene esa elevación al final, ya que, con el atributo de Coseno de la Fase, se localizan algunos estratos que cambian su forma de depósito, ya que éstos se encuentran ubicados de una forma horizontal, además de que cuentan con una continuidad lateral notoria respecto al horizonte dos, que cuenta con estratos mucho mas fracturados; a partir de la traza 1121, éstos comienzan a tener una cierta inclinación hacia arriba, los cuales están marcados en color morado, lo cual a suponer que son debidos a los efectos eustáticos (Figura 5.12).

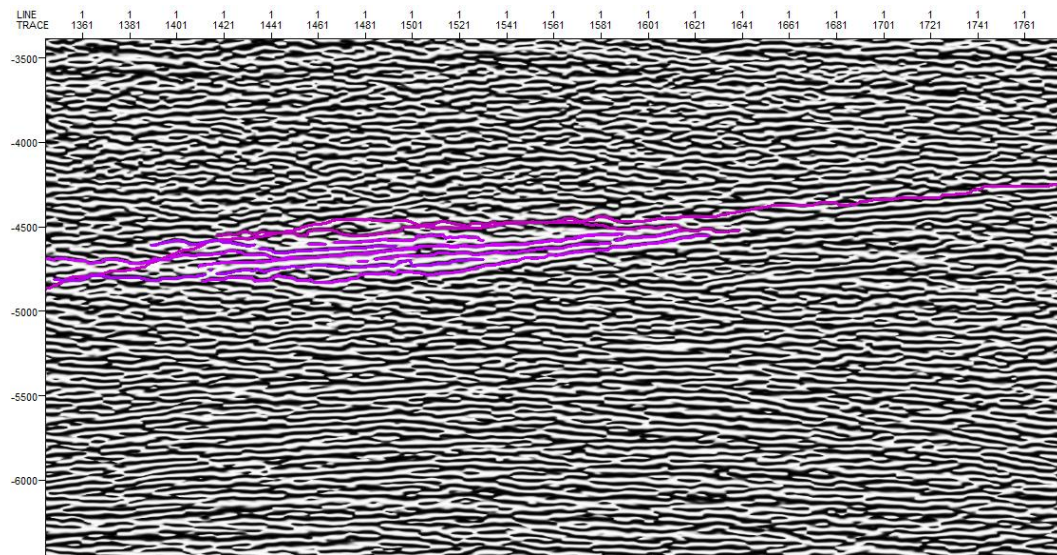


Figura 5.12 Atributo Coseno de la Fase, fragmento de la línea Chicx13b que va de la traza 1361 a la traza 1761 y muestra en color morado estratos que presentan continuidad lateral y una inclinación visible hacia arriba.

Aquí se presentan dos ejemplos claros de dos fallas localizadas mediante el uso del Atributo de Fase Instantánea; que como se había mencionado previamente, es útil para localizar este tipo de estructuras; la falla marcada en color azul marino, presenta una falla normal pues destaca claramente como el “bloque” de piso asciende, deslizándose así el estrato; mientras que la falla

marcada en color negro, es una falla inversa ya que claramente destaca como el estrato de la parte izquierda (bloque de techo), que se elevó (Figura 5.13).

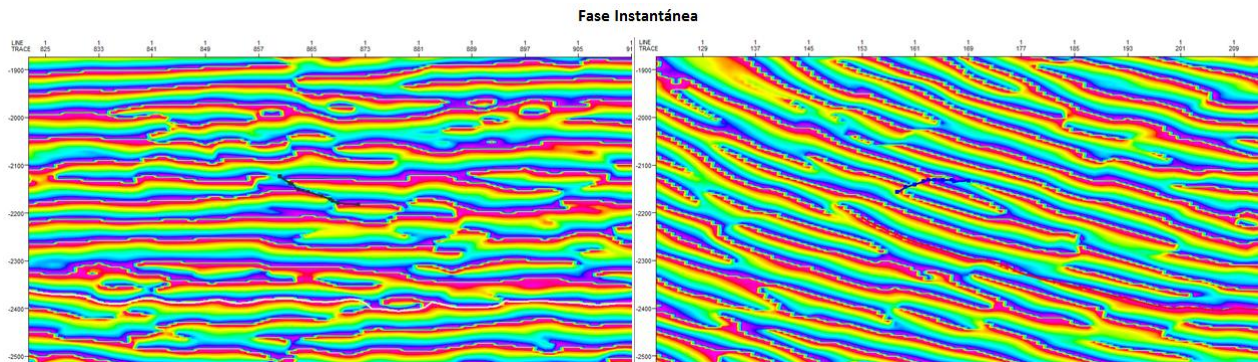


Figura 5.13 Muestra la presencia de dos fallas señaladas en color negro y azul respectivamente, mediante el uso del atributo de Fase Instantánea.

Por último se presenta el Diagrama de Línea, el cual muestra todas las estructuras marcadas y mencionadas anteriormente, recordando que la línea en color rosa claro, en sí, no es un Horizonte como lo son el morado, rojo y morado claro, ya que, como se explico anteriormente, solo muestra la posible ubicación de evaporitas (Figura 5.14).

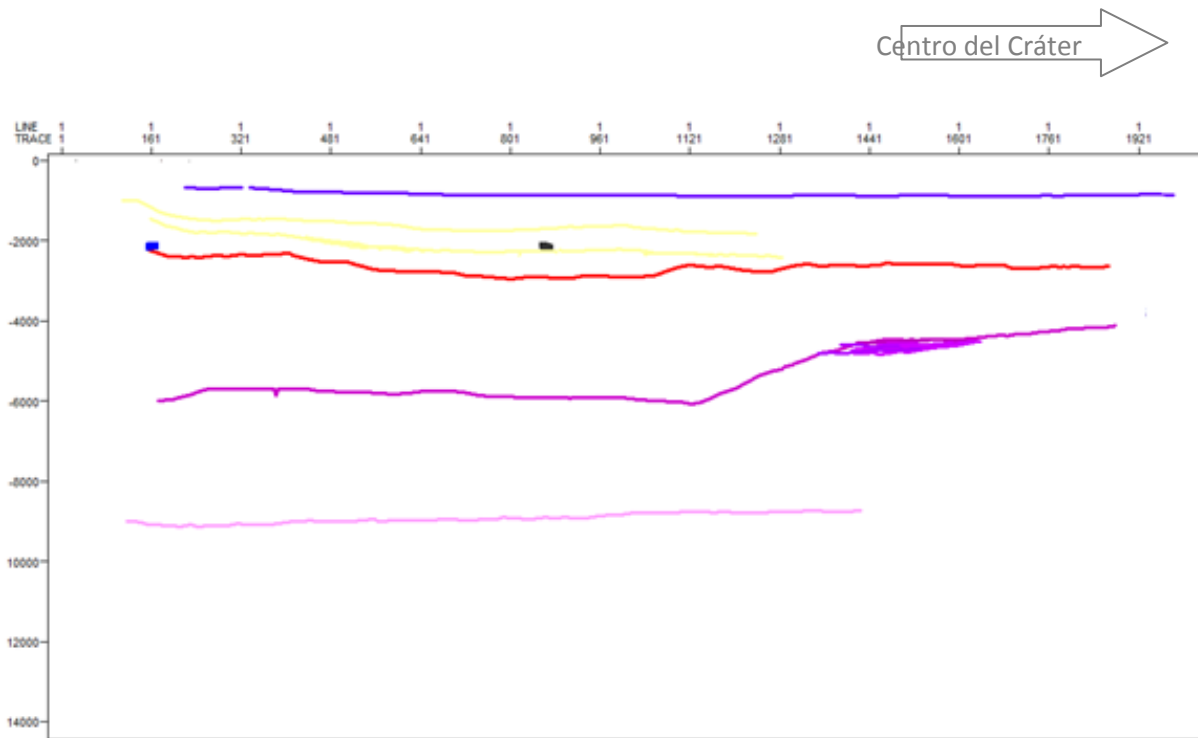


Figura 5.14 Diagrama de Línea de la Línea Chicx13b.

Ahora bien, la línea Chicx13b se encuentra localizada en la parte NE en uno de los anillos internos del Cráter, fue adquirida de Oeste a Este de forma paralela a la costa (Figura 4.5).

Como se puede ver en el mapa de anomalía gravimétrica, la línea se encuentra en una zona baja que pareciera una cuenca, la cual fue originada por los efectos de compresión del impacto. Esto indicaría que en esa zona la secuencia K/Pg, no debería mostrar gran espesor ni una variación en el, pues la línea no pareciera invadir alguna parte más alta, lo cual al momento de correlacionar el perfil con los atributos podemos ver que el espesor K/Pg se encuentra entre 0 a 800 *ms*, sin mostrar alguna variación en profundidad (Figura 5.14).

- **Chicx16**

En la línea Chicx16 se pudieron definir 4 paquetes (Figura 5.15); el Primer paquete comprende de los 0 a los 900 *ms* de profundidad mostrando una continuidad lateral buena y una baja amplitud; por tales motivos se define que se trata del paquete que corresponde al Terciario caracteriza por su depósito en estratos horizontales; el segundo paquete varia de los 900 *ms* a los 2200 *ms*, mostrando zonas de baja amplitud en la mayoría del paquete, lo cual coincide con la imagen que presenta el atributo de Caos, pues esta baja amplitud se relaciona a zonas fracturadas; el tercer paquete comprende de los de los 2200 *ms* a los 8200 *ms* y, por último, el cuarto paquete se encuentra de los 8200 *ms* a los 14000 *ms* de profundidad presentando, una zona de amplitudes altas, siendo el paquete con mayor índice de estratos horizontales o rectos con mejor continuidad lateral.

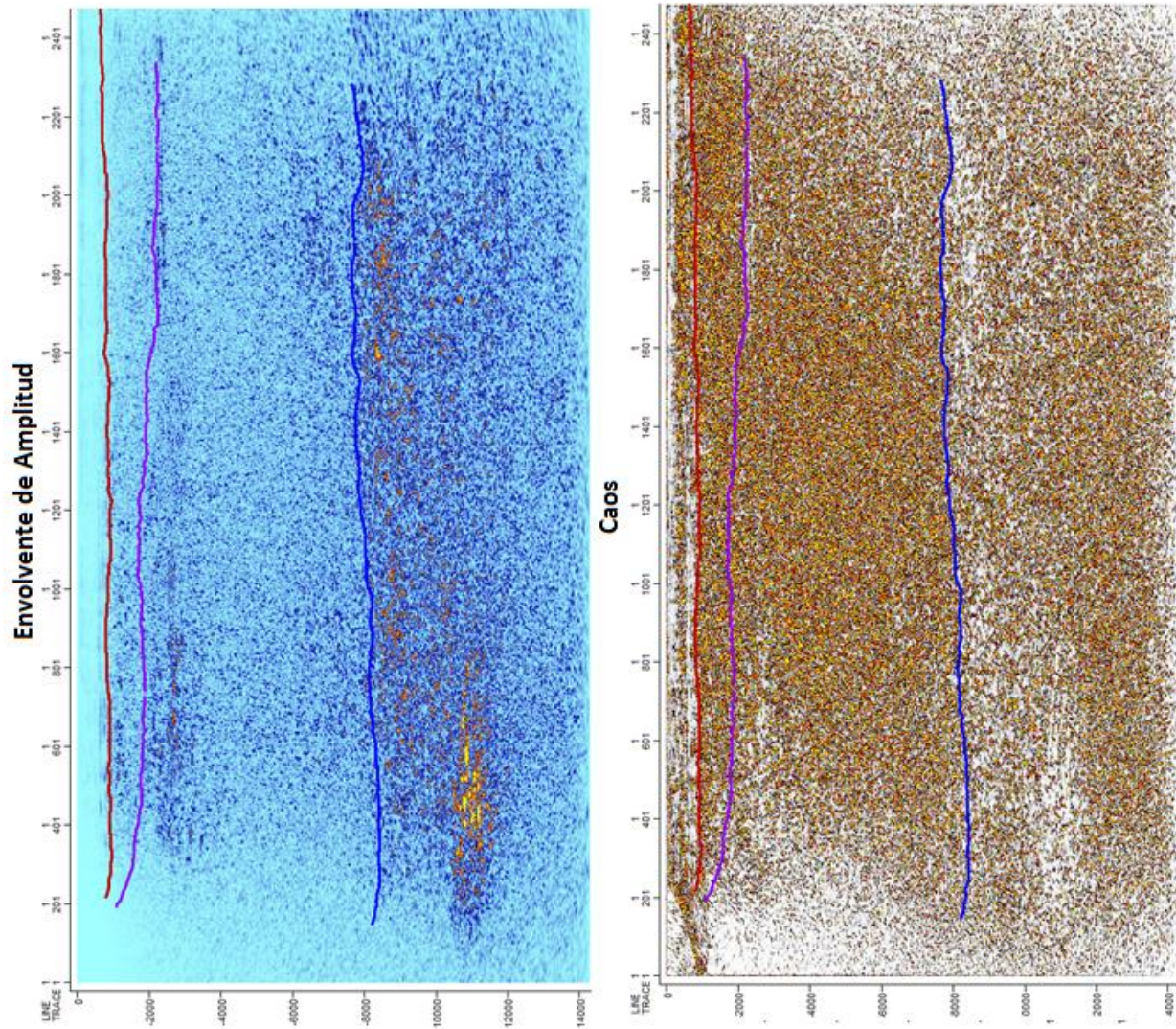


Figura 5.15 Se muestra la Línea Chicx16 a la cual se le aplicaron los atributos Envolverte de amplitud (der) y Caos (izq.), definiéndose 4 paquetes distintos.

Esta línea se encuentra de forma perpendicular a la costa (Figura 5.16); en la figura ésta se localiza del lado derecho, teniendo en cuenta que la estructura marcada en color verde es una estructura de tipo clinoforme; este tipo de estructuras se pueden asociar al acarreo de sedimentos que pro gradan hacia las zonas más profundas, proveniente de la costa lo cual crea esa efecto de más ancho el estrato conforme se va alejando de la costa. En la esquina inferior derecha de la imagen ciertos estratos marcados en color rosa se encuentran localizados a partir

de la traza 2001, éstos se encuentran depositados de forma inclinada, y a partir de la traza 2001 hacia atrás estos van cambiando a estratos más rectos, lo cual nos hace pensar que se debe a los efectos de deposición de los sedimentos normales que proviene de la costa, sobre la plataforma inclinada.

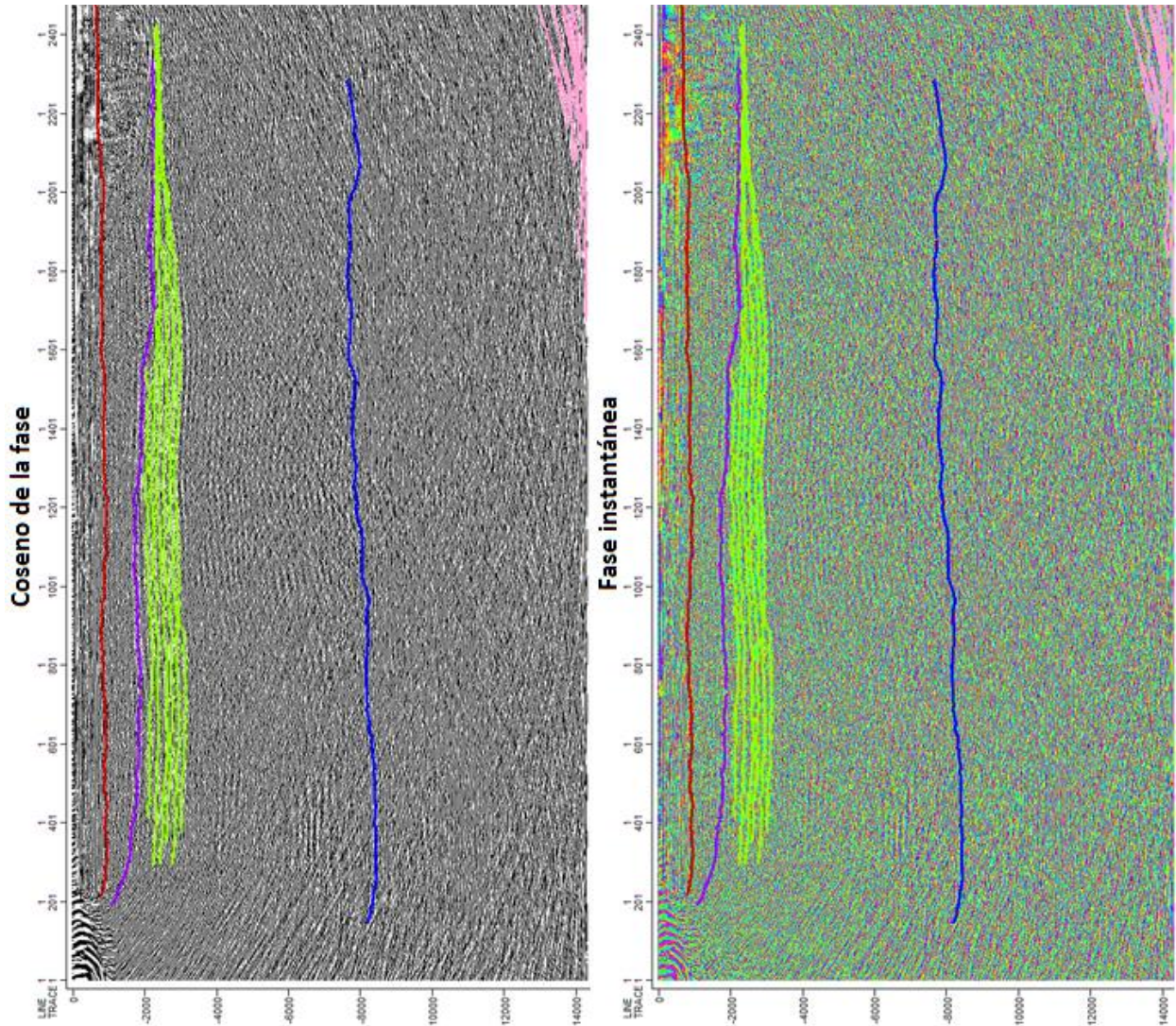


Figura 5.16 Línea Chicx16, muestra en color verde una estructura clinoforme y en rosa una serie de estratos con una inclinación.



En color azul marino se muestra una falla de tipo inverso y en color negro, se muestra una falla de tipo normal, demostrando que el atributo de fase instantánea es9 efectivo para localizar ese tipo de estructuras (Figura 5.17).

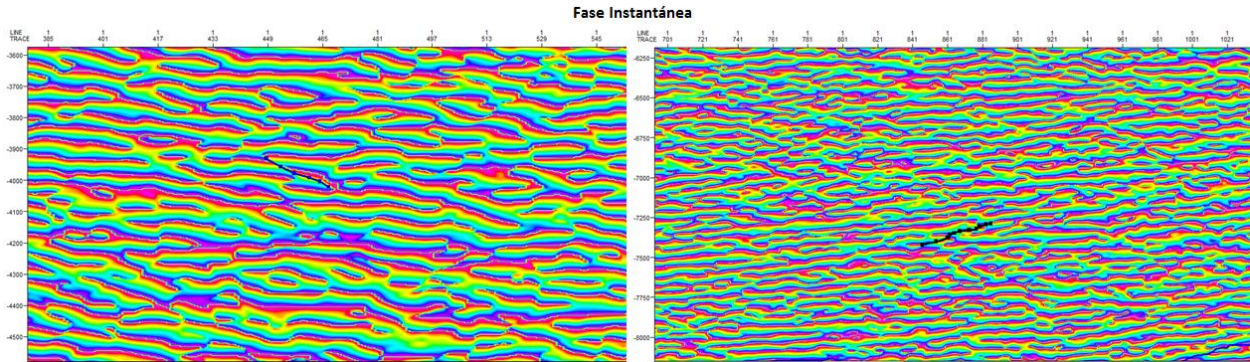


Figura 5.17. Se muestra la presencia de dos fallas, en color azul marino (der.) y en negro (izq.).

Mediante el atributo de Coseno de la fase, fue posible localizar la presencia de algunos sets de múltiples, como se puede ver en la imagen debajo del horizonte marcado en color morado existen una serie de estratos de mayor grosor entre los 2000 *ms* a los 3100 *ms* de profundidad lo cual los hace más visibles con respecto a los demás, estos mismos se repiten en 3800 *ms* a los 4500 *ms* y de los 4800 *ms* a los 6400 *ms*; teniendo en cuenta que los múltiples son fantasmas, los cuales enmascaran las estructuras que se desean destacar. Por ellos el objetivo del procesamiento de los datos, es tratar de reducir la aparición de este tipo de fantasmas al mínimo en nuestros perfiles sísmicos (Figura 5.18).

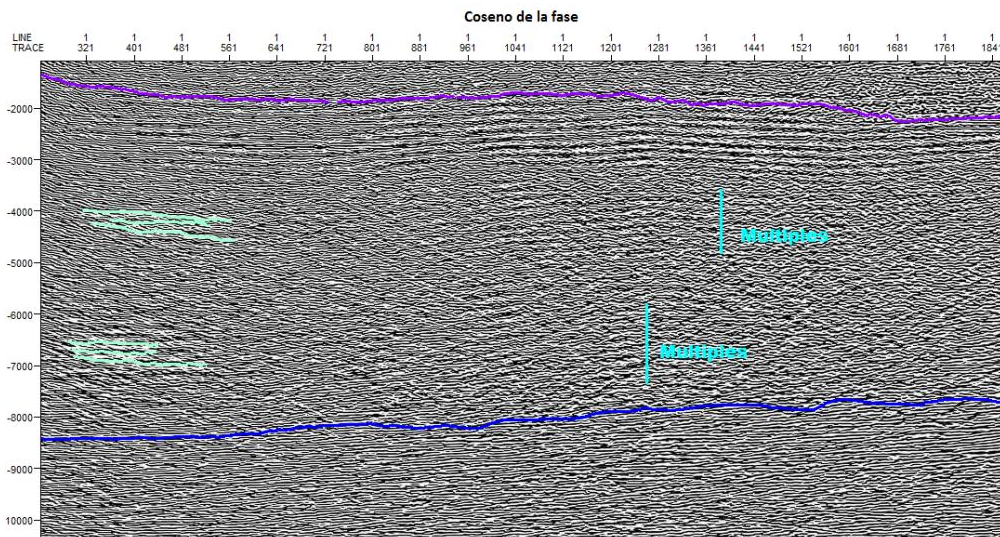


Figura 5.18 En color azul se muestra la presencia de múltiples localizados mediante el atributo de Coseno de la fase.

Por último, aquí se presenta el diagrama de línea el cual muestra las estructuras antes mencionadas; las líneas roja, lila y azul están mostrando los horizontes (limites) entre cada paquete litológico; las líneas en color amarillo claro, son estratos rectos, que fueron detectados mediante los atributos de Caos y Envolvente de amplitud (Figura 5.19).

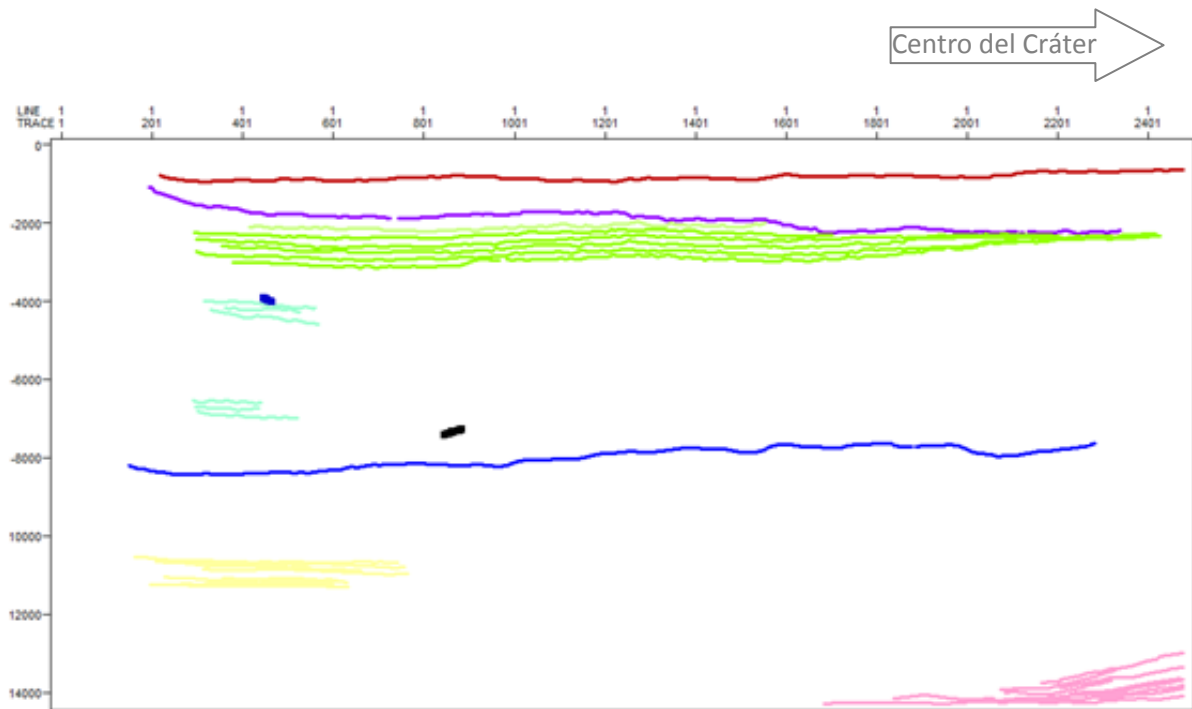


Figura 5.19 Diagrama de Línea de la línea Chicx16.

La línea Chicx16 se localiza en la parte NW del cráter, justo sobre una anomalía que en algunos casos, se ha llegado a sugerir por algunos autores que es la huella del impacto; fue adquirida en dirección Norte a Sur con respecto al centro del cráter (Figura 4.5).

La ubicación de la línea con respecto al mapa gravimétrico, sugiere que ésta comienza en una zona alta y conforme llega a su longitud final va terminando en una zona baja, que podría ser una cuenca originada por la formación de los múltiples anillos, esto podría compararse a una zona de talud, lo que haría que la zona alta represente un borde de la cuenca sedimentaria creada por el impacto, dicha cuenca comienza en el anillo interno. Al analizar la imagen con los atributos, se puede apreciar que el espesor del K/Pg parece ser constante, con excepción de una ligera variación en profundidad a partir de la traza 1001, aunque no es significativa, ésta puede ser originada por el cambio de altitudes que presenta en la zona de transición de la anomalía a la pendiente de la cuenca. Se puede agregar que los 2 paquetes siguientes a la zona K/Pg se ven afectados por el impacto, ya que muestran un fracturamiento severo, sin embargo, el último paquete muestra cierta continuidad en sus reflectores, pero también muestra cierta afectación, pues presenta reflectores cuneiformes en los extremos de los perfiles. Ahora bien, correlacionando los resultados obtenidos mediante el análisis de atributos sísmicos, se concretaron 4 distintos paquetes litológicos, el primero con un espesor de 0 a 900 *ms*, el segundo de 900 a 2200 *ms*, el tercero de 2200 a 8200 *ms* y por último de 8200 a 14000 *ms*; esto podría encajar con el modelo del Cráter sugerido por Salguero-Hernández et al. (2010) para esta zona, lo cual podría indicar que probablemente el segundo paquete es la brecha superior, el tercero es la roca fundida (*melt*) y por último la mega brecha, ya que los espesores marcados por medio de los atributos son similares.

- **Chicx23**

Se lograron definir 4 diferentes paquetes para la línea Chicx23; en esta línea no se observa una variación grande de amplitudes. El atributo de caos tampoco marca una gran diferencia en la continuidad (zonas blancas) de los diferentes eventos que esta línea presenta; por lo tanto, fue difícil marcar la terminación de cada uno de ellos; el primer paquete se definió de 0 a los 1100 *ms*, el segundo paquete de los 1100 *ms* hasta los 3200 *ms*, el tercer paquete de los 3200 *ms* hasta los 9500 *ms*, siendo este el último paquete en el que mayor continuidad lateral muestra respecto a los demás y, por último, el cuarto paquete de en los 9500 *ms* a los 14200 *ms*, los cuales se muestran a continuación en la figura 5.20.

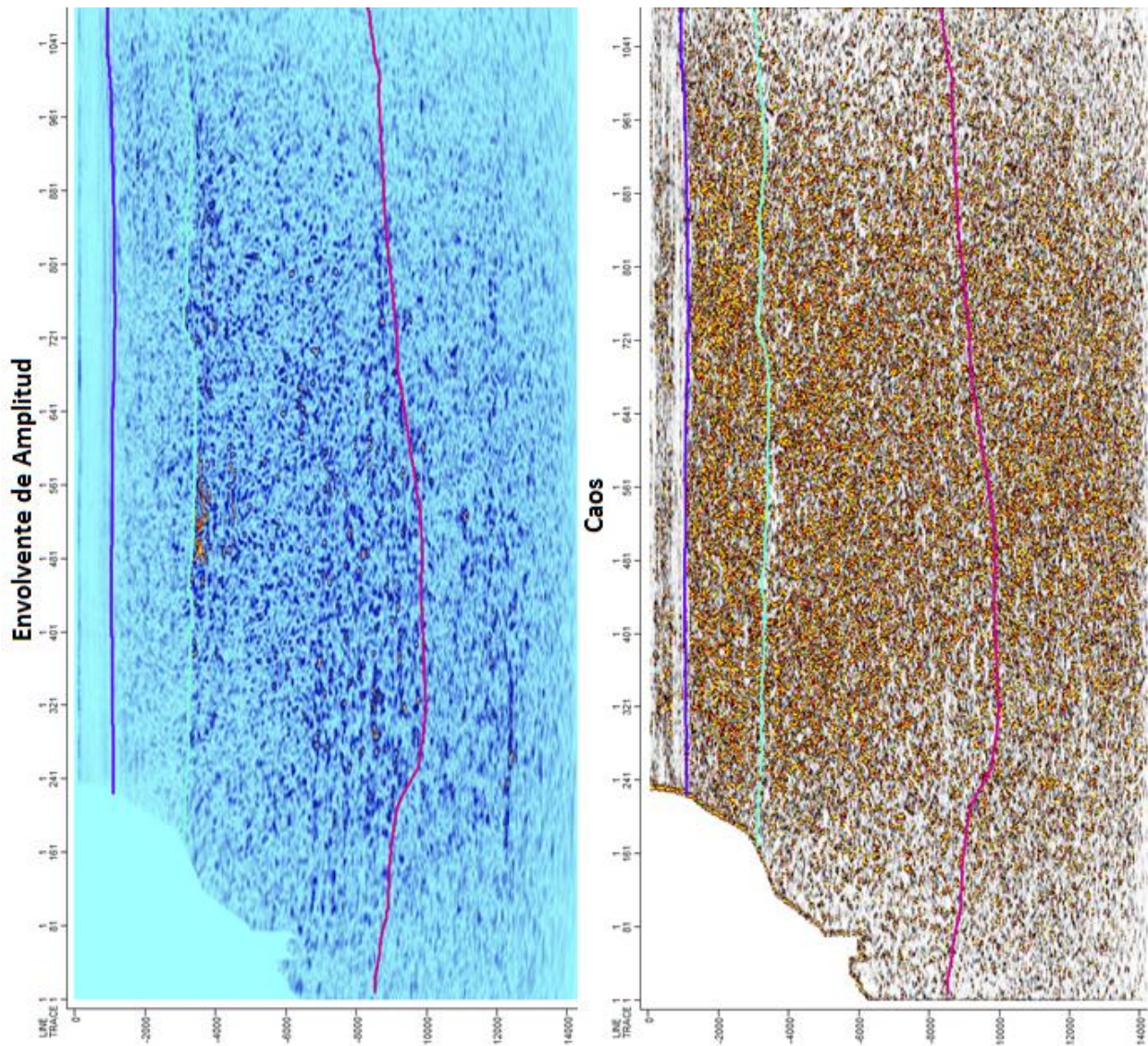


Figura 5.20 Definición de los Horizontes para la línea Chicx23.

Con los atributos de Coseno de la fase y Fase instantánea se aprecian que el paquete cuatro, se encuentra limitado por el horizonte marcado en color morado y se hace aún más evidente la presencia de una estratificación cuneiforme, lo cual, haría pensar que la imagen está sobre-migrada, aunque en realidad lo que destacan son el efecto de las “sonrisas” (smiles); pero al ver el horizonte marcado en color morado, observa el comportamiento de los estratos que es justamente como lo muestra la línea de separación entre paquetes, reafirmando lo que se marcó previamente con los atributos de caos y envolvente de amplitud (Figura 5.21).

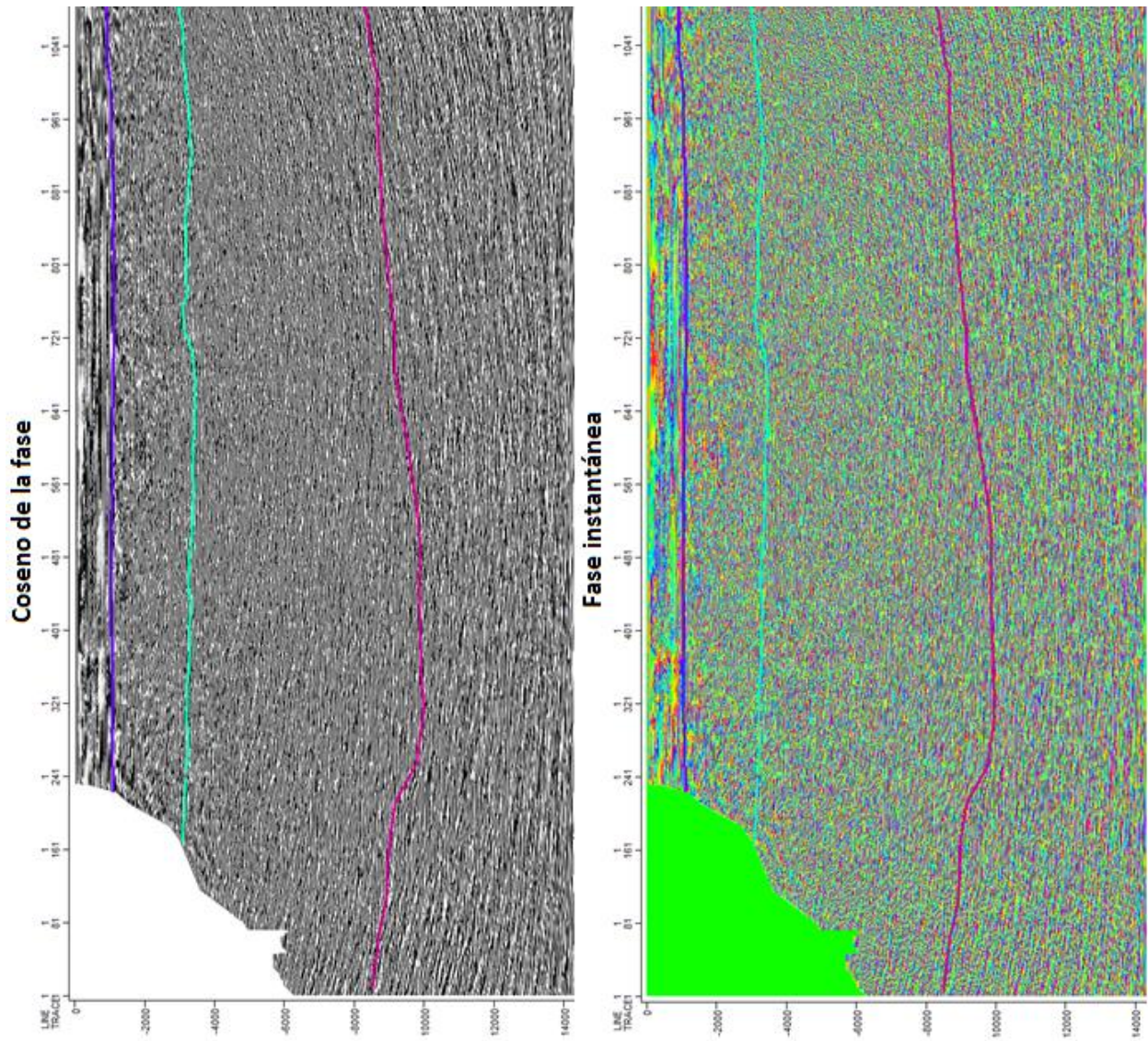


Figura 5.21 Atributos de Coseno de la fase y Fase instantánea en la línea Chicx23.

A continuación se presenta el diagrama de línea correspondiente a línea Chicx23, el cual muestra los eventos marcados mediante los diferentes atributos utilizados (Figura 5.22):

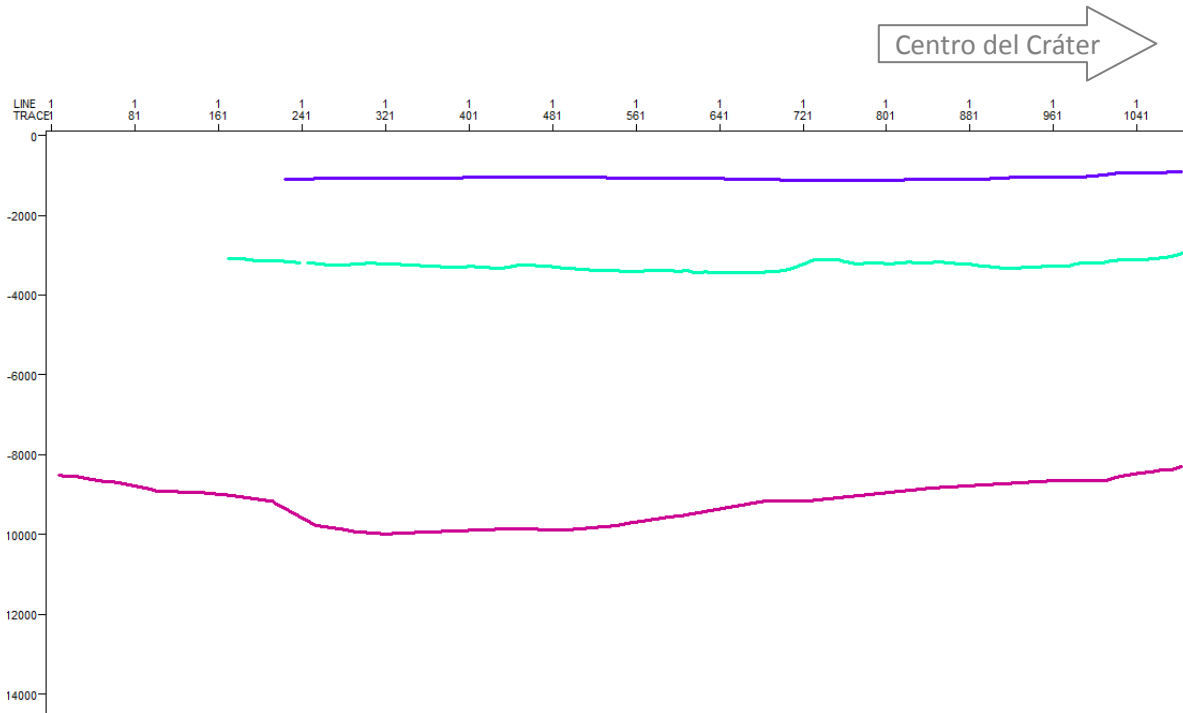


Figura 5.22 Diagrama de línea correspondiente a la línea Chicx23

Mediante la figura 4.5 y lo analizado antes, se ubica a la línea CHicx23 en la parte NE, su adquisición fue de Norte a Sur con respecto al *Peak Ring*.

De acuerdo al mapa gravimétrico, la línea se localiza en una zona con pendiente correspondiente al borde de la cuenca del anillo interno, ésta se puede apreciar claramente cómo inicia en la zona alta y conforme se llega a la longitud final termina en una zona baja del borde de la cuenca sedimentaria, siendo resultado del impacto; ésta zona de baja altitud no presenta una gran variación en su depresión. Por medio del análisis con atributos, se puede ver que el espesor marcado para la capa K/Pg, presenta una mínima variación en profundidad con respecto a su espesor, a partir de la traza 641, donde se aprecia como éste tiene un cambio, haciéndolo ligeramente más ancho, lo cual corresponde a la pendiente antes mencionada. Se puede agregar que los 2 paquetes continuos muestran huellas del impacto pues se encuentran severamente fracturados, mientras que el paquete 3 vuelve a mostrar presencia de reflectores de tipo cuneiforme como en la línea Chicx16, por lo tanto, se pudiera pensar que al momento del impacto los estratos parecieran haberse movido en forma de bloque, ya que los 3 paquetes muestran cierta congruencia, dejando el paquete de la brecha superior y la roca fundida como los más afectados por el impacto, dejando a la mega brecha hamacada por este efecto.

- **Chicx23A**

La línea Chicx23A también se ubica de forma perpendicular a la costa y ésta se encuentra hacia el lado izquierdo perfil (Figura 5.23). Se localiza la capa del Paleógeno por su baja amplitud y continuidad lateral, posicionándola a una profundidad de 0 a 800 *ms*; en seguida hay una capa con una amplitud visiblemente mayor con respecto a la primera, observando el atributo envolvente destaca esta capa que tiene una formación de tipo ondulado, que también se corrobora con el atributo de caos; esto haría suponer que se tratara de un plegamiento, tal vez, ocasionado por la fuerza del impacto del meteorito a una profundidad de 800 *ms* a 3000 *ms*; el tercer paquete es una zona de baja amplitud y se localiza a una profundidad de 3000 *ms* a 6200 *ms* y, por último, el cuarto paquete a 14350 *ms* muestra los efectos eustáticos en la parte izquierda de la imagen como una pequeña pendiente, lo cual, puede ser una posible transgresión, y que vuelve a mostrar una textura de continuidad en el atributo de caos.

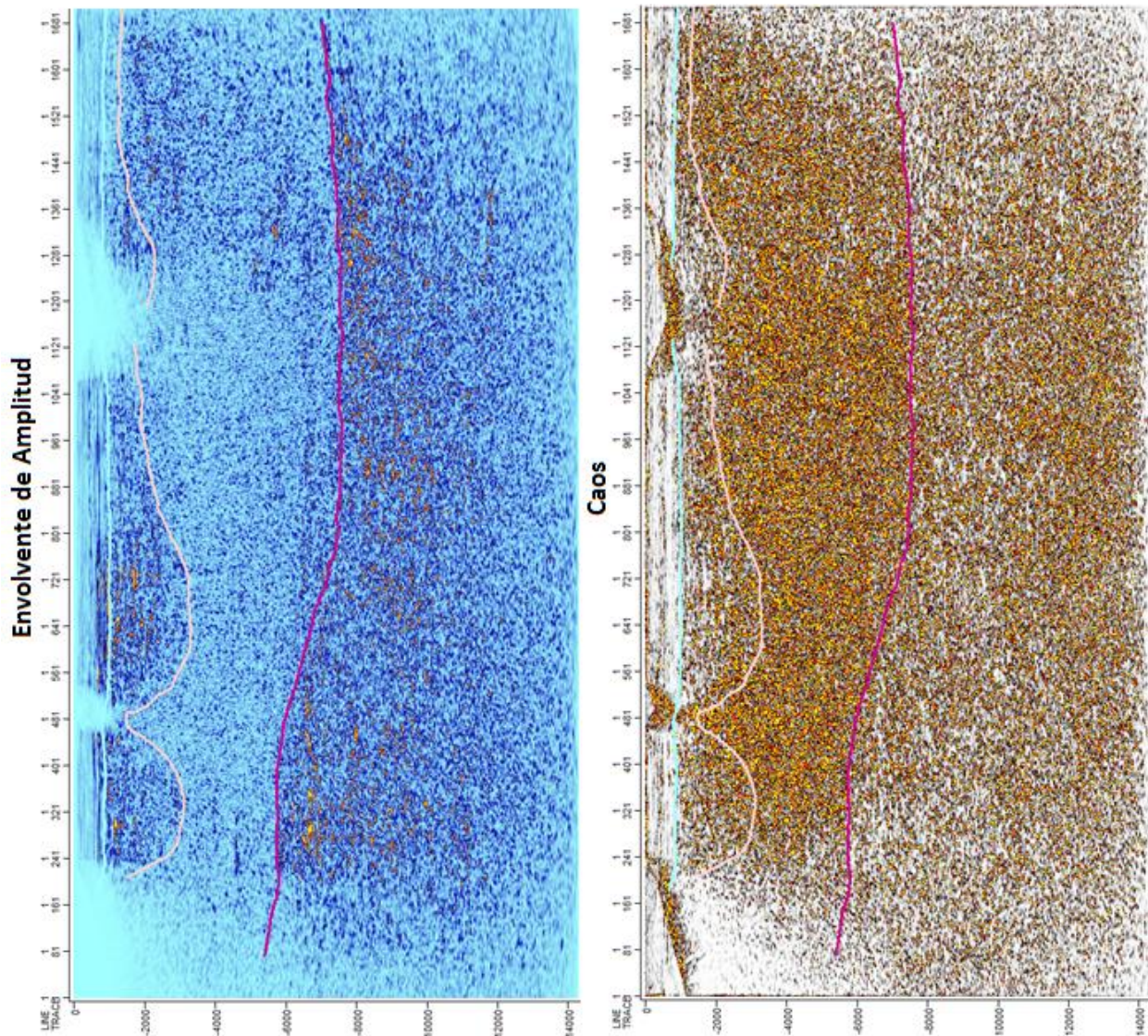


Figura 5.23 Se muestra a la línea Chicx23A con 3 Horizontes definidos.

Como este análisis no es contundente por la forma ondulada del paquete y la cual no se relaciona con la líneas antes analizadas, se utilizó el atributo de coseno de la fase, para analizar la continuidad de éste, así como, su textura, lo cual reveló un comportamiento peculiar, ya que muestra a los reflectores entre-lazados, que no puede ser, pues los sedimentos no pueden depositarse de esta forma. De suponer que hubiera existido una fuerza que haya empujado a los estratos, estos no hubieran podido tomar esa posición, por lo tanto, se cree que debe ser



causado por los errores de adquisición que se encuentran localizados justo encima de estos reflectores, como se muestra en la figura 5.24.

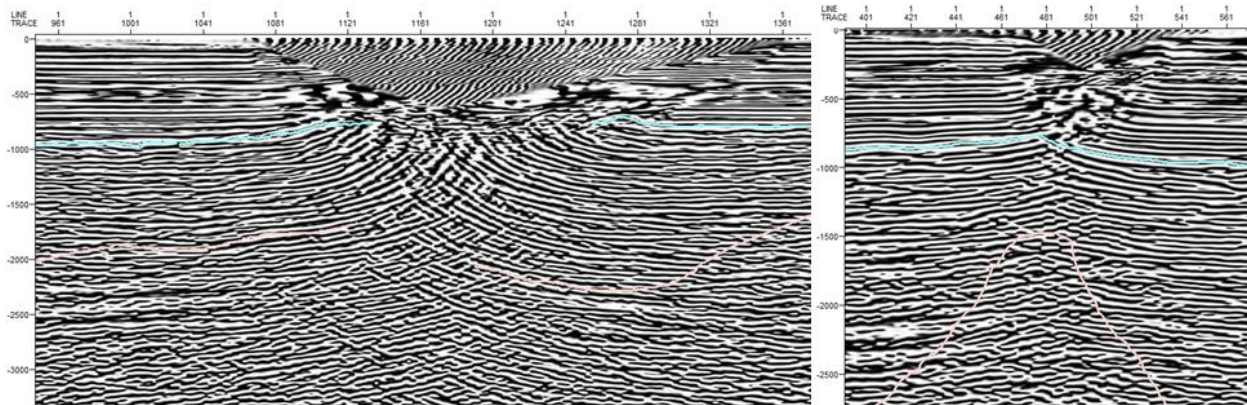


Figura 5.24 Reflectores entre cruzados de la línea Chicx23A.

Estos errores pueden estar causando el efecto como de sonrisas (hipérbolas), al aplicarle a la imagen los atributos sísmicos. Con esto, se descartan totalmente las teorías sobre plegamiento sobre este paquete (Figura 5.25).

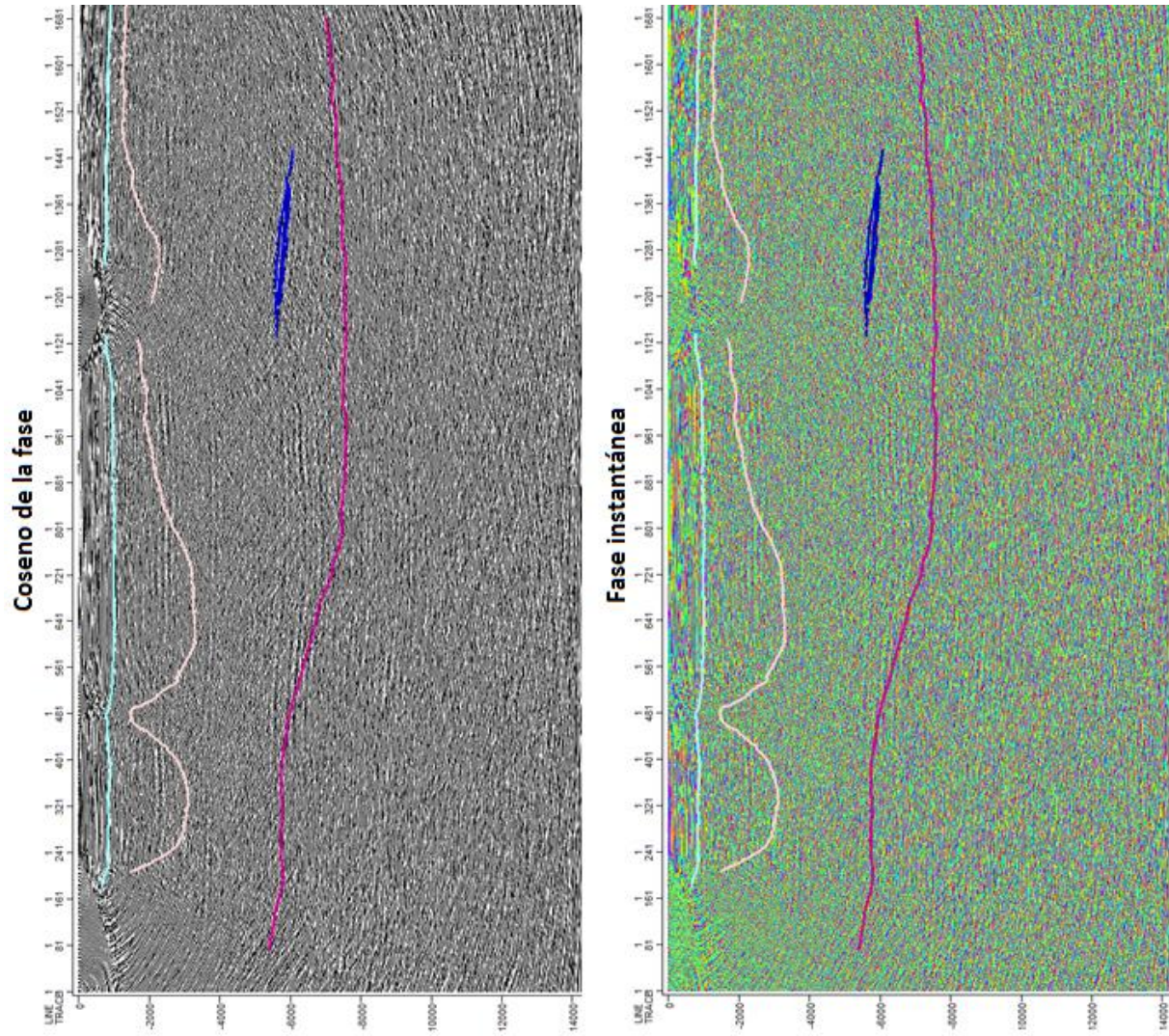


Figura 5.25 Atributos Coseno de la fase y Fase instantánea para la línea Chicx23A, en los cuales se encuentra marcado en color azul, un posible lente.

En la figura 5.26 se muestra en color azul que hay una estructura en forma de lente, pero al ver los estratos adyacentes se interpreta que posiblemente se trate de una pequeña transgresión causada por los efectos eustáticos; ya que los estratos que están en la parte inferior de esta estructura se encuentran depositados en forma horizontal, al igual que los estratos que se localizan en la parte superior y, si fuera una estructura lenticular los estratos serían congruentes con la estructura.

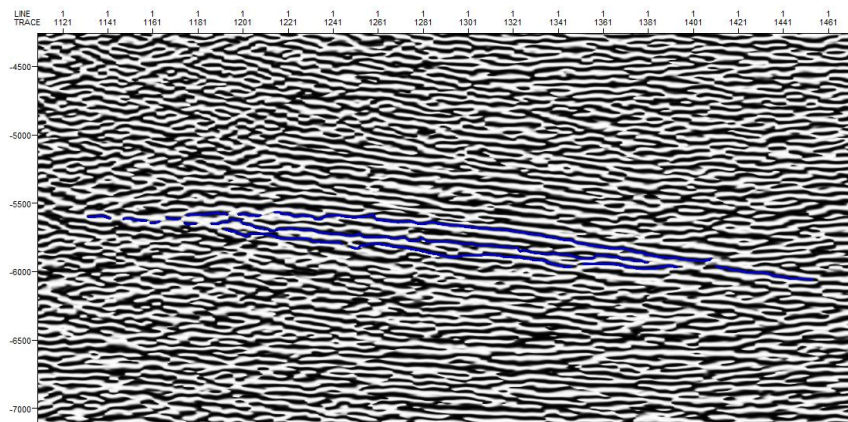


Figura 5.26 Atributo Coseno de la Fase, el cual muestra en color azul una estructura que pareciera ser un lente.

Mediante el atributo de fase instantánea se localizó una falla de tipo normal, la cual se encuentra marcada en color negro, ésta misma pasa por la estructura marcada en color azul con el atributo de Coseno de la fase, se puede ver claramente como la estructura se encuentra elevada en su parte final (Figura 5.27).

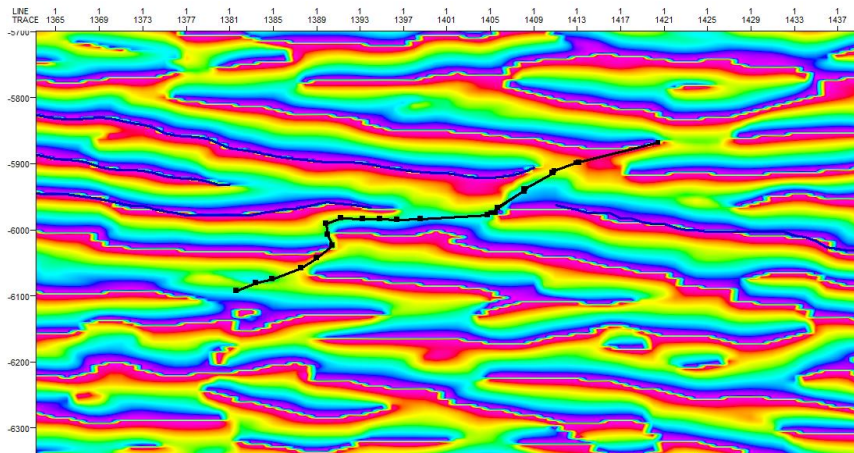


Figura 5.27 Falla de tipo normal localizada a través del atributo de Fase instantánea en la línea Chicx23A.

A continuación en la figura 5.28 se presenta el diagrama de línea el cual muestra los eventos previamente mencionados:

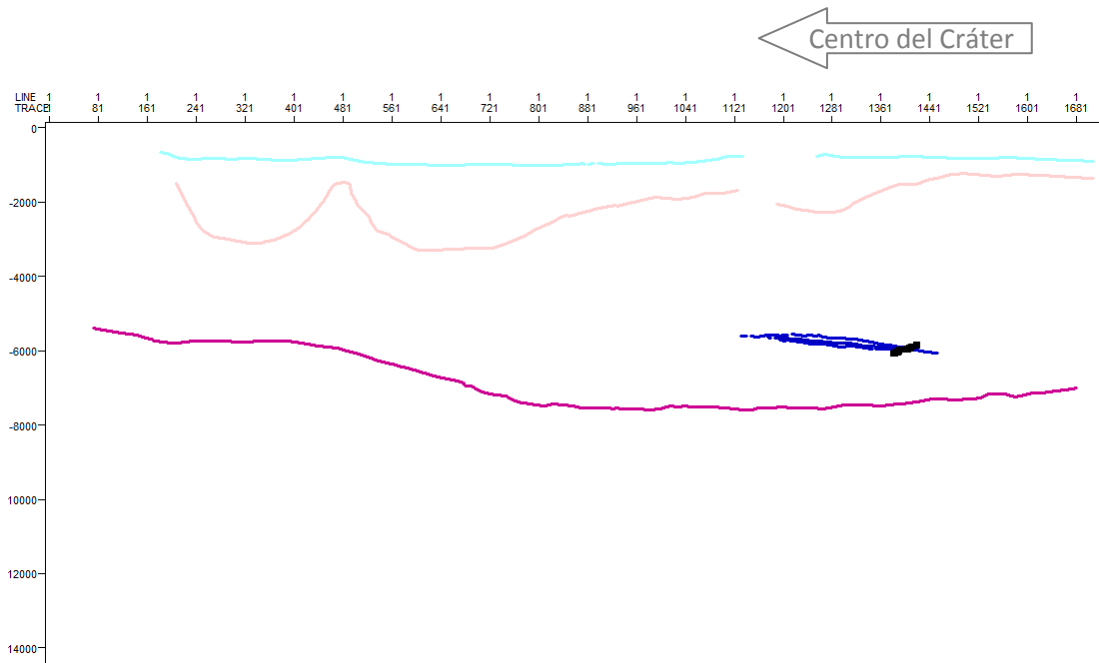


Figura 5.28 Diagrama de línea para la línea Chicx23A.

La línea Chicx23a se localiza en la parte NE, en el borde de la cuenca del anillo interno del Cráter; su adquisición tuvo una dirección de Sur a Norte.

La ubicación de la línea con respecto al mapa gravimétrico, sugiere que comienza en una zona de transición dentro del anillo interno, de una zona alta a una zona baja, posicionándola justo sobre una marcada pendiente, esto con respecto a las demás líneas adquiridas de forma perpendicular hacia el centro de cráter, analizadas en este trabajo. El análisis con atributos muestra que la zona del K/Pg es relativamente constante, presentando un espesor entre 0 a 800 ms con cierta variación a partir de la traza 481 hasta la 1281, donde comienza a reducir ligeramente su espesor concordando claramente con el efecto de depósito provocado por la pendiente. Se puede notar que el efecto del impacto para el tercer paquete es claro ya que los estratos se encuentran fracturados, siendo la parte media la más afectada, presentando algunos estratos con cierta continuidad lateral en el borde Norte, mientras que el paquete 4 el que se sugiere ser la mega brecha sigue presentando menor afectación al impacto, siendo congruente con las líneas analizadas previamente. Una vez más, se concretaron 4 paquetes litológicos distintos por medio de atributos sísmicos, los cuales al correlacionarlos entre sí, muestran un espesor similar a los marcados en la Línea Chicx16 y Chicx23.

- Chicx24

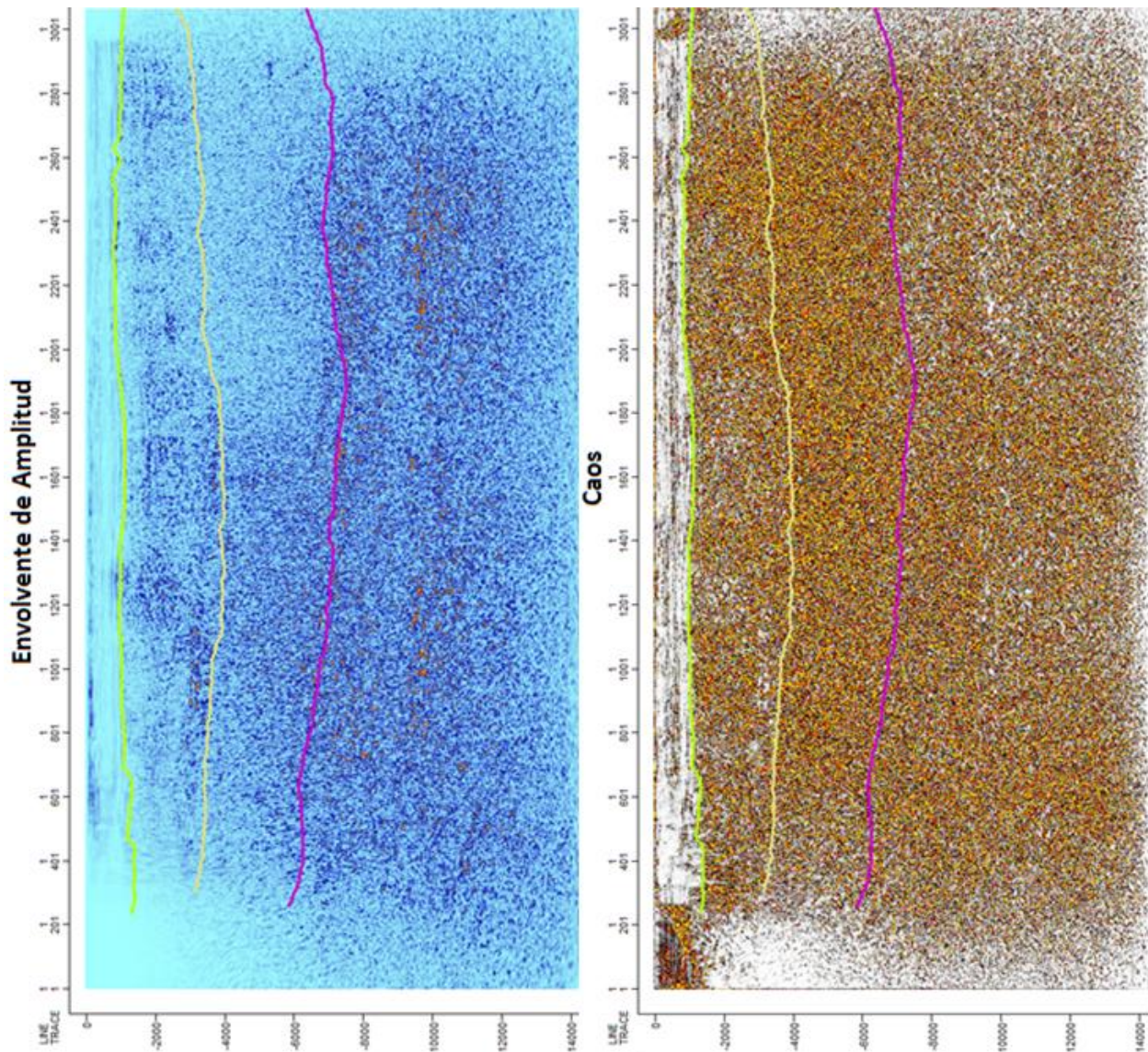


Figura 5.29 Línea Chicx24 en la cual se marcan 3 distintos horizontes con los atributos de Caos y Envolverte de Amplitud.

La línea Chicx24 muestra la presencia de 4 paquetes (Figura 5.29); el primero se encuentra, entre profundidades de 0 a los 1100 *ms*, el cual es un paquete con estratificación horizontal y continua (la capa del Paleógeno); a continuación se encuentra el segundo paquete, que varía de los 1100 *ms* a los 3400 *ms*, y destaca la diferencia en amplitudes respecto al primer paquete que cambian notoriamente, el atributo de caos destaca de color naranja, con algunas zonas blancas, lo cual indican que este paquete se encuentra muy fracturado, pero aun así, se logran

conservar algunos eventos horizontales; el paquete tres se localiza a partir de los 3400 *ms* hasta los 6250 *ms* de profundidad, siendo el paquete que presenta mayor fracturamiento y, por último, el paquete cuatro, que se ubica entre 6250 *ms* hasta los 14325 *ms* de profundidad y, en él se nota que vuelven a hacerse presentes algunos eventos continuos.

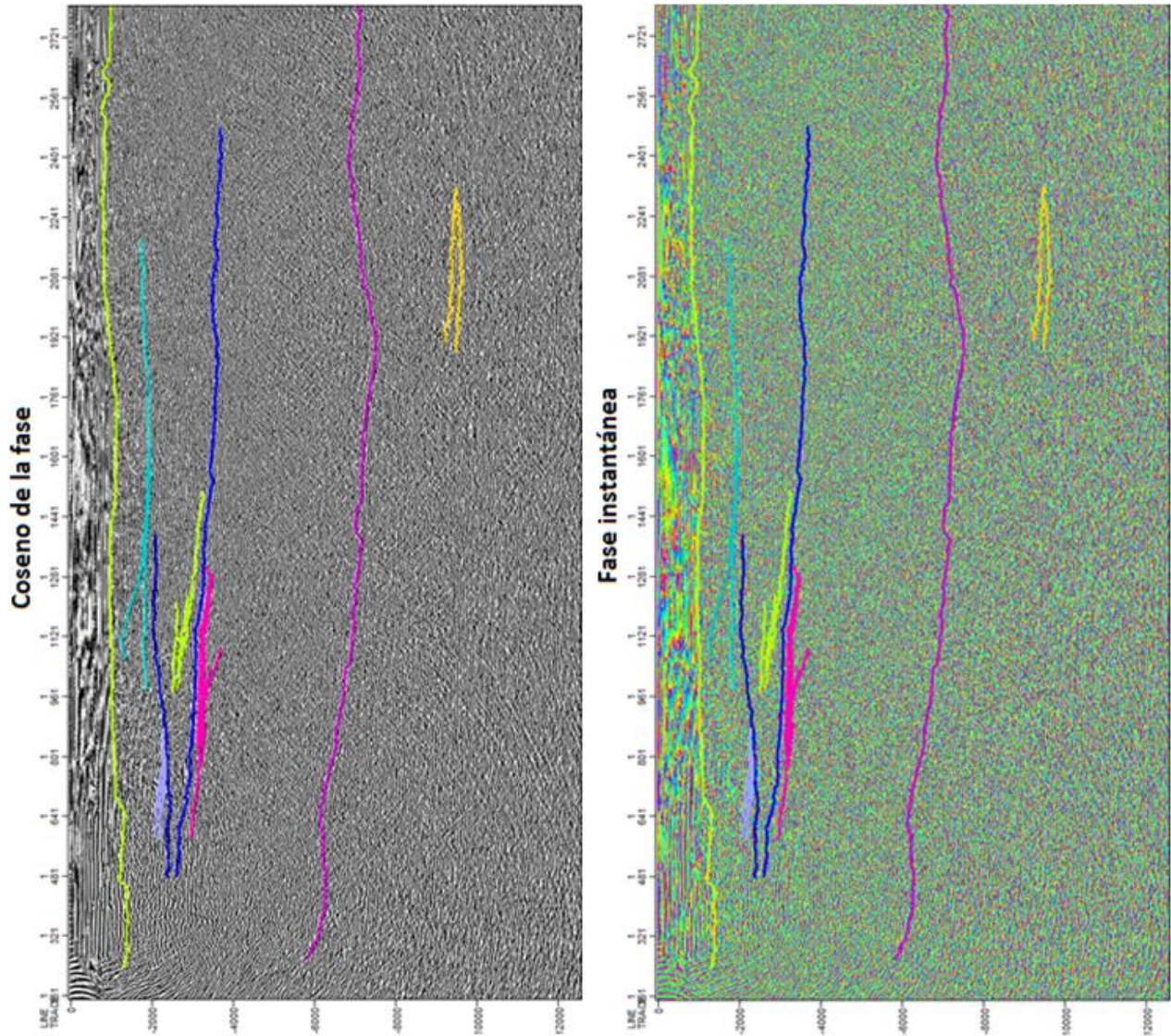


Figura 5.30 Localización de distintos acuíferos por medio del atributo de Coseno de la fase y Fase instantánea.

La línea Chicx24 se encuentra de forma perpendicular con respecto a la costa (Figura 5.30); por lo tanto, se localizan una estructura de tipo clinoforme en el segundo paquete, marcado en

color azul marino. En el caso de no conocer en donde se localiza la línea de costa este tipo de estructuras nos ayudan como un indicador de ello. En esta línea se pueden ver varios acuñaientos, los cuales se encuentran en ambos sentidos, en color azul claro en la parte superior a los 1800 *ms* de profundidad y en la traza 1301, está el primer acuñaiento, en él vemos que los estratos se comienzan a acuñar hacia el lado derecho, en color lila tenemos el segundo el cual se encuentra entre los 2000 *ms* y los 2250 *ms* de profundidad acuñando justo encima de la estructura cliniforme y en el mismo sentido que el de color azul, el tercer acuñaiento, se encuentra marcado en color rosa a la profundidad de 3200 *ms* y se acuña hacia el sentido izquierdo; por último en color naranja la cuarta cuña a una profundidad de 9500 *ms* se acuña en sentido derecho; la presencia de estas cuñas y la forma en la que están dirigidas, podrían ser indicadores del comportamiento del mar. También se puede notar que la mayoría de los estratos se encuentran fracturados pero en el caso de las cuñas, los estratos más próximos presentan cierta continuidad lateral.

La figura 5.31 muestra en color azul, un estrato con un plegamiento, además se aprecia que los estratos próximos a él están fracturados, lo cual pudo ser causado por la fuerza de impacto del meteorito; en color naranja se aprecia la formación de un lente que probablemente pudo ser ocasionado por la comprensión de la roca al momento del impacto, también se puede interpretar que el lente, por sus características visibles, pueda ser de un composición más frágil a los estratos adyacentes, ya que el lente presenta un fracturamiento mayor a los estratos superiores e inferiores.

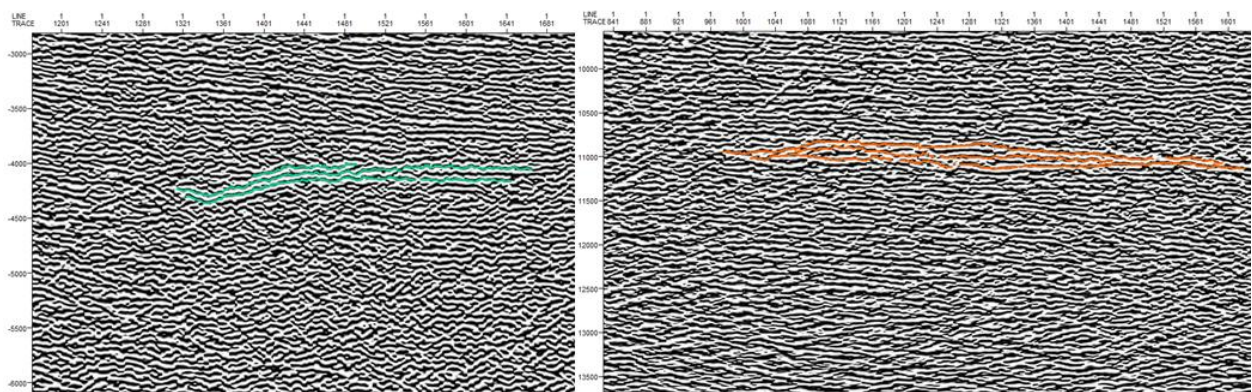


Figura 5.31 Atributo de Coseno de la fase, muestra marcado en color azul una estructura plegada (izq.) y del en color naranja un lente (der.).

A continuación se presentan todas las estructuras marcadas antes mencionadas en el siguiente diagrama de línea (Figura 5.32):

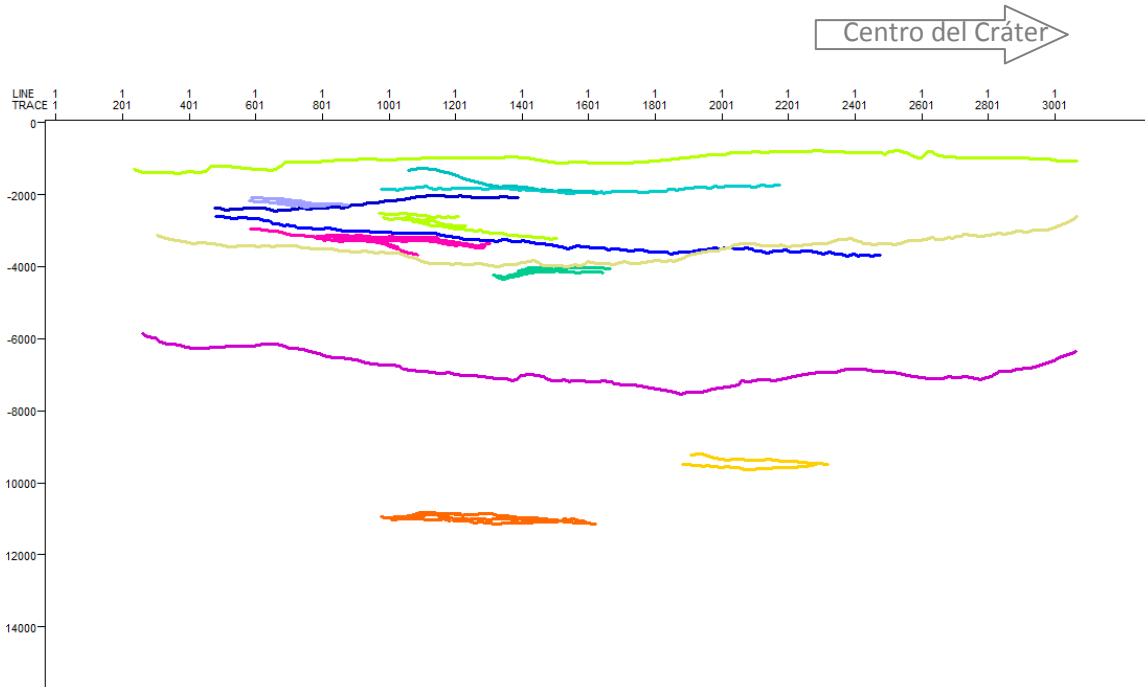


Figura 5.32 Diagrama de línea la línea Chicx24.

La línea Chicx24 está ubicada dentro de la zona NE del cráter, la dirección de su adquisición fue de Sur a Norte.

De acuerdo a su ubicación dentro del mapa gravimétrico, la línea cruza la zona del anillo interno, sugiere que en su longitud inicial comenzó en una zona baja y conforme fue avanzando a su longitud final termina en una zona alta, lo cual corresponde con la cuenca sedimentaria originada por la creación del anillo interno, posicionándola en el borde de éste; además se puede agregar que la línea toca una zona de pendiente al extremo norte, lo cual corresponde a la zona de transición entre el anillo interno y el comienzo del anillo externo. Al analizar la línea por medio de atributos, se puede apreciar con mayor facilidad como el espesor del K/Pg presenta una variación respecto al espesor final de la línea, pues éste comienza a perder cierto grosor a partir de la traza 1761 hasta la 2401, lo cual corresponde al efecto de depósito sobre el borde de la cuenca sedimentaria del anillo interno; así mismo, a partir de la traza 2401 el espesor del K/Pg comienza a aumentar, lo que se relaciona a la zona de transición entre la cima del anillo interno y la pendiente de inicio al anillo externo. Al correlacionar los resultados obtenidos mediante atributos sísmicos, se concretaron 4 distintos paquetes litológicos, los cuales concuerdan con el modelo del Cráter Chicxulub sugerido por Salguero-Herndandez et al.



(2010), agregando que el modelo presenta cierta variación en espesor sobre la brecha superior conforme se va alejando hacia el Este del centro del cráter, lo cual concuerda con lo marcado en esta línea para el segundo paquete, pues aumento su espesor visiblemente respecto a las otras líneas que se analizaron en este trabajo.

## Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

- Los atributos sísmicos son una herramienta eficaz para resaltar eventos y estructuras no fácilmente observables en los perfiles sísmicos. En el estudio con atributos se pudo observar que así como se hacen más evidentes los eventos, también nos resaltan características no deseadas que de cierta forma enmascara información, como es el caso de los sets de múltiples que se localizaron con el atributo Coseno de la fase en la línea Chicx16. Ello enfatiza la importancia de un buen procesado, ya que es una parte fundamental para la eliminación o reducción de este tipo de fantasmas. Para esto la deconvolución predictiva puede ser una herramienta de mucha utilidad, ya que, ésta se encarga de reducir al mínimo la presencia de estos.
- Existen distintos tipos de atributos, pero muchos de éstos son similares entre si, ya que nos permiten resaltar en algunos casos características similares; en este trabajo se utilizaron 4 atributos, los cuales se utilizaron en forma conjunta en el análisis: Envolvente de Amplitud- Caos y Fase instantánea- Coseno de la fase. Los análisis empleando multiatributos permiten una forma más eficiente, pues brindan la posibilidad de corroborar información para lograr así una mejor interpretación. Ello se ilustra en el caso de la línea Chicx23A, en la cual se observó una situación peculiar al tratar de definir el segundo paquete (cambio de facies), debido a que por los errores de adquisición hicieron que los atributos mostraran un comportamiento diferente al observado en las demás líneas.
- El atributo de Fase instantánea mostró ser una buena herramienta para la localización de fallas, marcan de una buena forma la continuidad lateral de los reflectores, mientras que el atributo Coseno de la fase, resultó más útil para diferenciar mejor el cambio de texturas en la imagen y corroborar la información de los horizontes marcados por medio de los atributos de caos y envolvente de amplitud, haciendo de este método una manera más eficaz.
- Se logró mostrar una consistencia (correlación lateral) con relación respecto a 4 líneas (Chicx16, Chicx23, Chicx23A y CHicx24), las cuales se ubican de forma perpendicular a la línea de costa, ya que al marcar los horizontes, se hacen presente 3 horizontes en cada una de las líneas además que se localizan a una profundidad similar en todas ellas, presentando en total 4 paquetes distintos (cambios de facies), los cuales se encuentran

entre los 8000 a 1100 *ms* para el primer horizonte, 1750 a 3400 *ms* para el segundo horizonte y 6200 a 8250 *ms* para el tercer horizonte.

- Los 4 atributos utilizados mostraron a la secuencia del Terciario, esto debido a las características peculiares (reflectores continuos) que este presenta, lo cual hizo muy fácil su definición en las 5 líneas, posicionándolo a una profundidad de aproximadamente entre 1100 a 800 *ms*, lo cual también ayudó a visualizar cómo los 4 atributos mostraban la continuidad para la definición de los horizontes.
- En las líneas Chicx16, Chicx23, Chicx23A y Chicx24 se observa un paquete de un grosor notoriamente mayor con respecto a los 3 paquetes previos, el cual mostró ser el paquete que menor afectación al impacto, ya que se logró observar una mayor continuidad lateral en sus reflectores.
- La importancia de una buena adquisición quedó ilustrada en la línea Chicx23A ya que esta fue afectada por la falta parcial de datos, haciendo que al aplicar los atributos se tuvieran en una forma no convencional al momento de separar el horizonte del segundo paquete, pues nos deformó su estructura mostrando cierto fenómeno, en el cual se le logra ver con el atributo de coseno de la fase, mostrando unos horizontes entrelazados.
- Se pudo observar que el impacto afectó en mayor grado a los paquetes 2 y 3, dejando en éstos grandes rastros de fracturamiento en los estratos presentes.

## 6.2 Recomendaciones

- Se propone realizar más estudios en el área. En los estudios se pueden abordar ciertas dudas como es el caso de la línea Chicx23A. La otra propuesta para estudios adicionales es la perforación de pozos en la zona del cubo sísmico, ello resultaría interesante, pues así se podrían corroborar los 4 cambios de facies marcados en este trabajo y contar con registros de pozos, para tener mejor control de las propiedades petrofísicas, columnas, correlaciones laterales y modelo de velocidades.

## Bibliografía

Barnes, A. (2006). "Too many seismic attributes." Canadian Society of Exploration Geophysicists Recorder **31**(3): 40-45.

Barnes, A. E. (2007). "A tutorial on complex seismic trace analysis." Geophysics **72**(6): W33-W43.

Chopra, S. and K. J. Marfurt (2005). "Seismic attributes—A historical perspective." Geophysics **70**(5): 3S0-28S0.

Dressler, B. O. and V. L. Sharpton (1999). Large meteorite impacts and planetary evolution II, Geological Society of Amer.

Gulick, S. P., P. J. Barton, et al. (2008). "Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater." Nature Geoscience **1**(2): 131-135.

Hildebrand, A., M. Pilkington, et al. (1998). "Mapping Chicxulub crater structure with gravity and seismic reflection data." Geological Society, London, Special Publications **140**(1): 155-176.

Hildebrand, A. R., G. T. Penfield, et al. (1991). "Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico." Geology **19**(9): 867-871.

Liner, C. L. (2004). Elements of 3D seismology, PennWell Books.

López-Ramos, E. (1975). "Geological summary of the Yucatan Peninsula." The ocean basins and margins **3**: 257-282.

Lugo Hubp, J., J. F. Aceves Quesado, et al. (1992). "Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán." Revista mexicana de ciencias geológicas **10**(2): 143-150.

Manual, P. (2007). Petrel Processes, Schlumberger.

Mendoza Torres F. (2011). "Análisis y Modelado Geofísico de la Estructura del Cráter Chicxulub." Tesis de Mestría, Instituto de Geofísica, UNAM.

Ortiz, A. C., J. U. Fucugauchi, et al. (2002). Investigaciones geofísicas sobre cráteres de impacto y el cráter de Chicxulub (Yucatán, México), Unam.

Padilla Sánchez, R. (2007). "Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México." Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana **59**(1): 19-42.

Penfield, G. and Z. Camargo (1981). Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetism and gravity. 51st Society Exploration Geophysicists Annual Meeting, Technical Program Abstracts.

Sheriff, R. E. (2002). Encyclopedic dictionary of applied geophysics, Society of exploration geophysicists.

Taner, M. T. (2001). "Seismic attributes." CSEG recorder **26**(7): 48-56.

Taner, M. T., F. Koehler, et al. (1979). "Complex seismic trace analysis." Geophysics **44**(6): 1041-1063.

Urrutia-Fucugauchi, J., J. M. Chavez-Aguirre, et al. (2008). "Impact ejecta and carbonate sequence in the eastern sector of the Chicxulub crater." Comptes Rendus Geoscience **340**(12): 801-810.

Yilmaz, Ö. (2001). Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data, SEG Books.

## Anexos

### Anexo-1

Paletas de colores que pertenecen los diferentes atributos utilizados en este trabajo, así como el correspondiente a los perfiles sísmicos en su escala original.

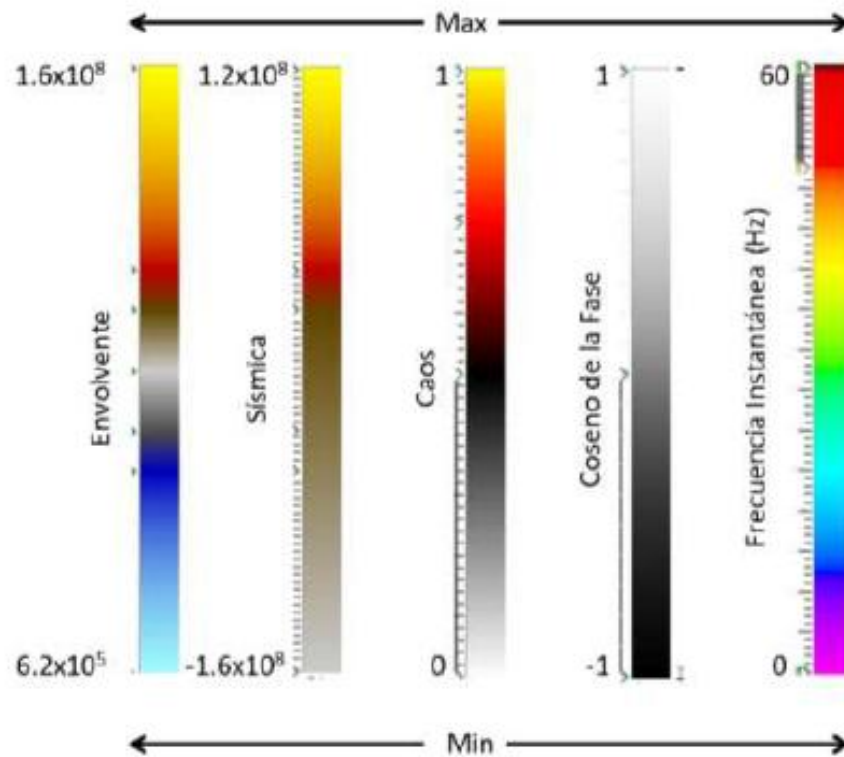


Figura A.1 Paletas de colores para los atributos: Envolvente de amplitud, Caos, Coseno de la fase y Frecuencia instantánea.

**Anexo-2**

Ubicación de las líneas Chicx13b, Chicx16, Chicx23, Chicx23a y Chicx24, con respecto a su ubicación dentro del cráter del Chicxulub.

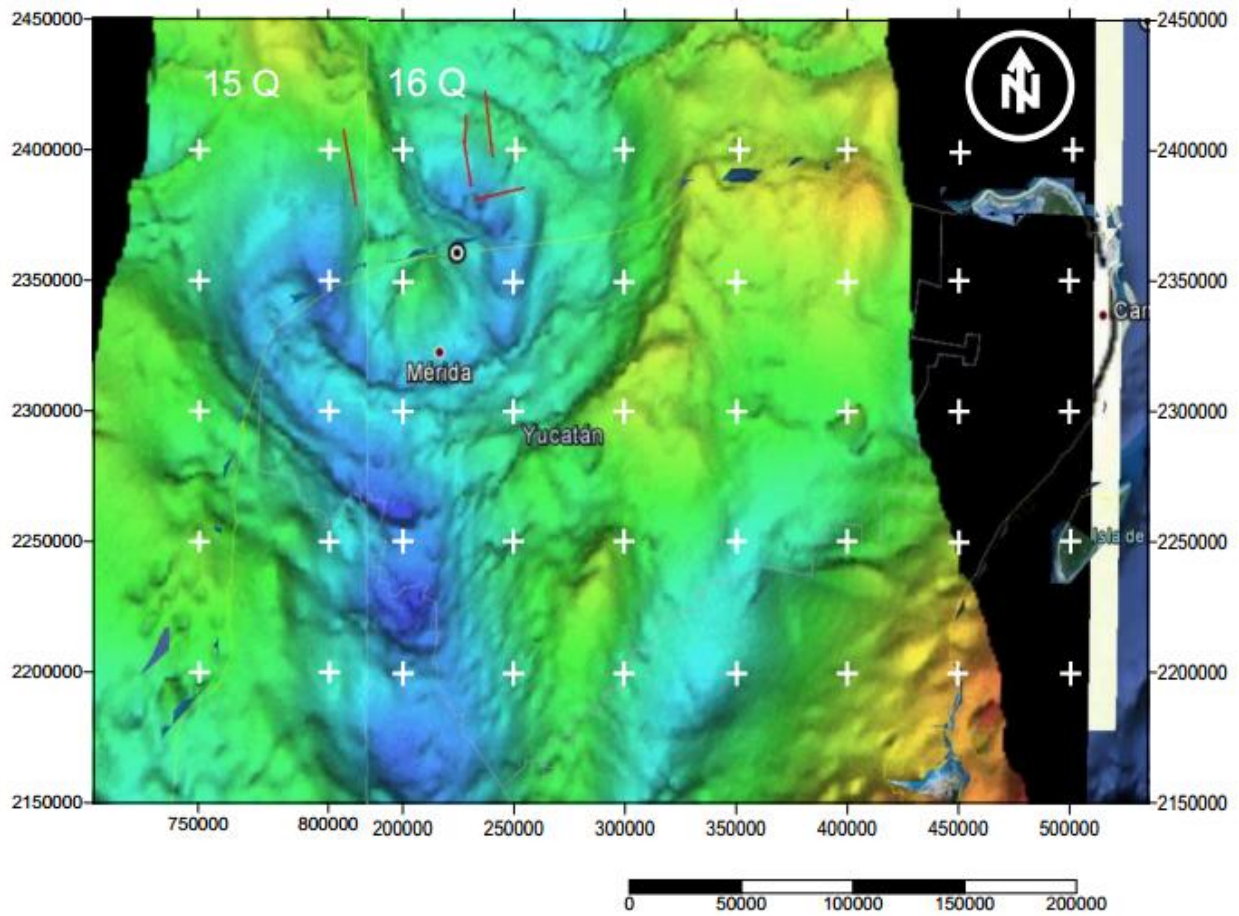


Figura A.2 Ubicación de los perfiles sísmicos con respecto a la Anomalía de Bouguer del Cráter Chicxulub (Modificado Urrutia et al, 2010).

**Anexo-3**

Esquema del Cráter Chicxulub propuesto por Salguero-Hernández, el cual tiene dirección de izquierda a derecha Oeste a Este. Según el esquema la ubicación para las líneas Chicx13b, Chicx23, Chicx23A y Chicx24, correspondería a la señalada por la flecha en color azul; mientras que para la línea Chicx16 la marcada en flecha color morado.

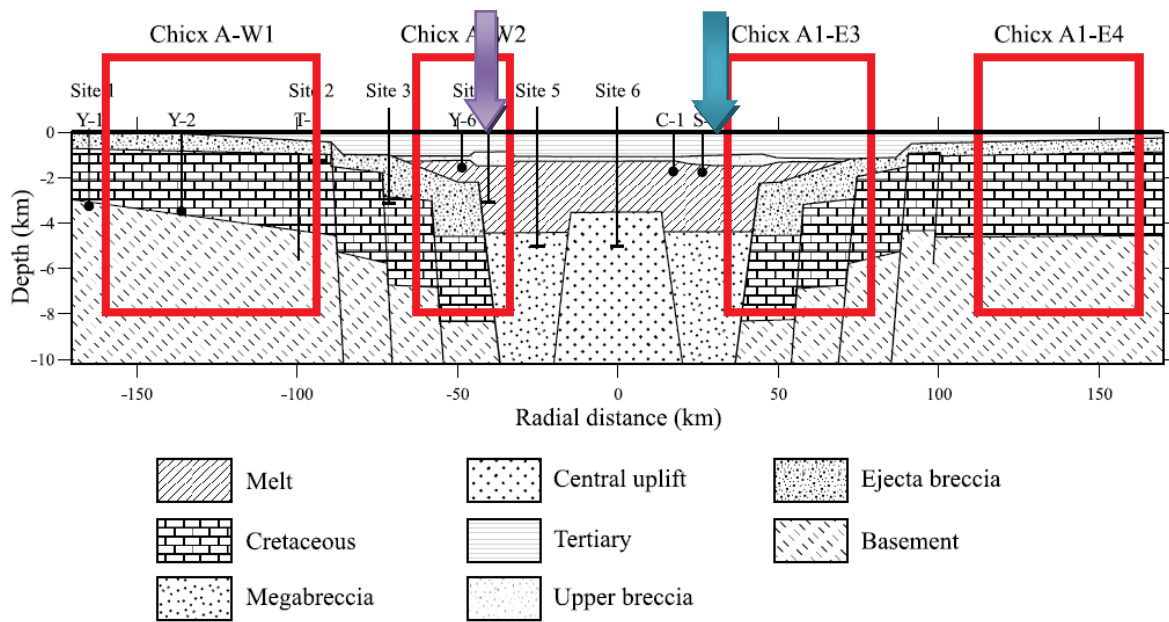


Figura A.3 Modelo esquemático del Cráter Chicxulub (Modificado, Salguero-Hernández et al. 2010).