

Procesamiento en tiempo de datos sísmicos 3D en zona de transición Cárdenas-Varadero-Camarioca, Cuba

Yamicela Tamayo López ¹.

¹ *Ingeniero en Tecnologías Nucleares y Energéticas, Máster en Geofísica Aplicada: Mención Petróleo y Gas, Investigador Agregado del Centro de Investigación del Petróleo, Churrucá, No.481, e/ Vía Blanca y Washington, Cerro, La Habana, CP 10600. ORCID: 0009-0009-5379-520X. Correo E.: yamigaby2014@gmail.com.*

RESUMEN

Las zonas de transición son zonas costeras que conectan mar y tierra constituyendo un desafío en la exploración sísmica. Dada las variaciones de la profundidad del agua, la topografía del fondo marino y el cruce con los cuerpos arrecifales se impone un procesamiento especial que compense la distorsión de amplitud y fase resultante de la combinación multivariada de las diferentes fuentes de energía y de receptores que garanticen una buena imagen del subsuelo con la visualización del modelo geológico del área. El procesamiento de la adquisición sísmica 3D transicional del área de Varadero del año 2007 no satisfizo los objetivos técnicos planteados, por lo que la sísmica 2D en todos estos años tomó mayor relevancia en la ubicación de nuevos pozos exploratorios que estaban dentro del área de la sísmica 3D. El objetivo de este trabajo fue mejorar la calidad del cuadro sísmico ondulatorio, así como la definición de un buen contraste entre las secuencias carbonatadas por encima de los 2s con respecto al procesamiento anterior y la aplicación de nuevos parámetros en la secuencia de procesamiento que respondiera a los ambientes de transición. La sísmica 3D procesada ocupa un área

total de 161 718 km² y se ejecutó con el programa GeoEast V3.0.6. De esta manera se logró obtener una buena diferenciación de los eventos sísmicos por encima de los 2s observándose mayor poder resolutivo de la calidad de la imagen lo que pudieran contribuir a la corroboración de zonas de interés o a la exploración de nuevas áreas perspectivas.

Palabras Clave: zonas de transición, adquisición sísmica procesamiento sísmico, sísmica 3D

ABSTRACT

Transition zones are coastal areas that connect sea and land, constituting a challenge in seismic exploration. Given the variations in the depth of the water, the topography of the seabed and the intersection with the reef bodies, special processing is required to compensate for the distortion of amplitude and phase resulting from the multivariate combination of the different energy sources and receptors that guarantee a good image of the subsoil with the visualization of the geological model of the area. The processing of the 3D seismic transitional acquisition of de Varadero area in 2007 didn't meet the technical objectives set, so that

the 2D seismic in all these years took on greater relevance in the location of new exploratory wells that were within the 3D seismic area. The objective of this work was to improve the quality of the waves seismic image, as well as the definition of a good contrast between the carbonated sequences above 2s with respect to the previous processing and the application of new parameters in the processing sequence that responded to transition environments. The processed 3D seismic occupies a total area of 161,718 km² and was executed with the software GeoEast V3.0.6. In this way, it was possible to obtain a good differentiation of the seismic events above 2s, observing greater resolving power of the image quality, which could contribute to the corroboration of areas of interest or the exploration of new perspective areas.

Keywords: transition zones, seismic acquisition, seismic processing, 3D seismic

RESUMO

As zonas de transição são zonas costeiras que ligam o mar e a terra, constituindo um desafio na exploração sísmica. Dadas as variações de profundidade da água, a topografia do fundo do mar e o cruzamento com os corpos recifal, é necessário um processamento especial para compensar a distorção de amplitude e fase resultante da combinação multivariada das diferentes fontes e receptores de energia que garantem uma boa imagem do subsolo com a visualização do modelo geológico da área. O processamento da aquisição sísmica 3D de transição da área de Varadero em 2007 não satisfaz os objetivos técnicos propostos, pelo que a sísmica 2D em todos esses anos tornou-se mais relevante na localização de novos poços exploratórios que estavam dentro da área sísmica. O objetivo deste trabalho foi melhorar a qualidade da imagem sísmica de onda, bem como a definição de um bom contraste entre as sequências carbonáticas acima de 2s em relação ao processamento anterior e a aplicação de novos parâmetros na sequência de processamento que respondesse a ambientes de transição. A sísmica 3D processada ocupa uma área total de 161.718 km² e foi

executada com o programa GeoEast V3.0.6. Desta forma, foi possível obter uma boa diferenciação de eventos sísmicos acima de 2s, observando maior poder resolutivo de qualidade de imagem, o que poderia contribuir para a corroboração de áreas de interesse ou a exploração de novas áreas de perspectiva.

Palavras chave: zonas de transição, aquisição sísmica, processamento sísmico, sísmica 3D

INTRODUCCIÓN

Este trabajo describe el procesamiento de la sísmica 3D transicional que comprende la región Cárdenas-Varadero-Camarioca de la provincia de Matanzas en la costa norte de Cuba con una extensión de 161.7 km², adquirida por la compañía CGG-GeoCaribbean en el año 2007 (Arriaza, 2007) a solicitud de CUPET. Fue procesada en el 2008 por la compañía *Geofizyka Torún*, lo cual no satisfizo los objetivos técnicos planteados, por lo que la sísmica 2D en todos estos años tomó mayor relevancia en la ubicación de nuevos pozos exploratorios que estaban dentro del área de la sísmica 3D en cuestión.

A partir de la necesidad de aclarar el cuadro geológico estructural de los apilados del norte del cubo 3D y evaluar nuevas y conocidas estructuras en estos yacimientos se concibe la realización de un nuevo re-procesamiento de los datos sísmicos con el propósito de mejorar la resolución sísmica en objetivos más profundos. Por lo que el objetivo de este trabajo fue mejorar la calidad de los eventos sísmicos, así como la definición de un buen contraste entre las secuencias carbonatadas por encima de los 2s.

En la **Figura 1** se presenta las líneas sísmicas 2D y 3D, así como algunos pozos aledaños al área de estudio, en específico la ubicación tierra-mar del cubo sísmico 3D transicional objeto de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

La adquisición 3D representó una gran complejidad sobre todo en la zona de transición de mar-tierra principalmente agua somera donde se utilizó una variedad de fuentes (dinamita, vibro, cañones de aire), y recep-

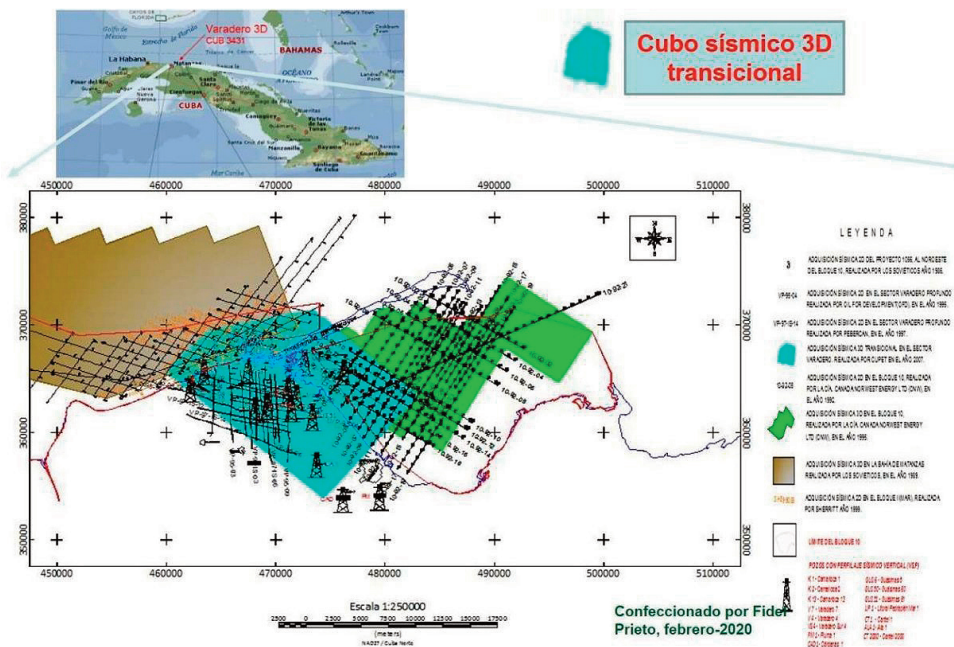


Figura 1. Ubicación del área de investigación

tores (geófonos, cables de dos sensores, hidrófonos). La parte terrestre es mayormente plana con extensiones de afloramientos de calizas (dientes de perro) lo que dificultó la calidad del trabajo obteniéndose información sísmica de regular a mala para darle respuesta a los objetivos técnicos planteados. En el dato primario se observa un alto nivel de ruidos y en algunas *inline* baja cobertura de trazas sísmicas.

Secuencia de procesamiento de migración pre-suma en tiempo, post-procesamiento y estudios de anisotropía del subsuelo.

Secuencia de procesamiento de migración pre-suma en tiempo, post-procesamiento y estudios de anisotropía del subsuelo.

El equipamiento utilizado fue el clúster HPC Huawei Cupet, sobre el cual se encuentra instalado el programa *GeoEast V3.0.6* (CNPC, 2015) con una plataforma *Linux CentOS 6.7*. La secuencia de procesamiento se dividió en las siguientes etapas: 1) Etapa de pre-procesamiento, 2) Etapa de migración y 3) Etapa de post-procesamiento.

1) Etapa de pre-procesamiento. Lectura de los datos de campo, conversión a formato interno y asignación de la geometría.

Los datos sísmicos sin procesar se encuentran demultiplexados en formato SEG-Y existiendo 20 swath que comprende la geometría del proyecto 3D. Estos fueron cargados al sistema de procesamiento y convertidos al formato interno. Se insertaron los archivos SPS (*Seismic Processing Support*) que vienen con la información de campo de la posición de las fuentes, receptores y la relación fuente-receptor. En la **Figura 2** se muestran algunos atributos geométricos que se identifican en los sísmogramas y CMP (punto medio común).

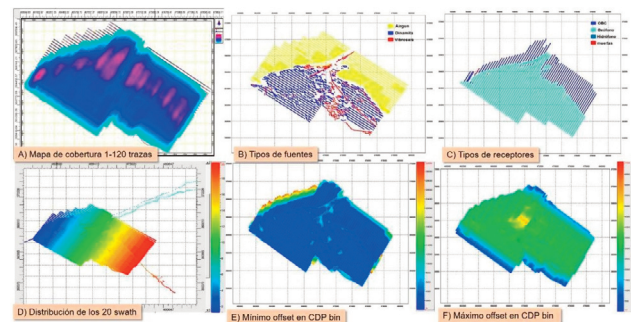


Figura 2. Control de calidad del proyecto 3D: mapas cobertura de trazas, tipos de fuentes, receptores, máximo y mínimo *offset* (alejamiento)

Codificación por tipos de receptores, trazas malas y mute. Conversión a fase mínima.

Se codificaron los tres tipos de receptores: Hidrófono para el *bay-cable* (H1, H2), geófono (G1 al G8) e hidrófono para agua somera (H3, H4) asignándose al encabezamiento de las trazas con el objetivo de ser diferenciadas durante el procesamiento, se eliminaron las trazas malas y se aplicó el blanqueo (*mute*) de las primeras entradas en los sismogramas siendo la primera atenuación de ruidos (**Figura 3**).

En la conversión a fase mínima se asumieron algunas consideraciones para que todas las ondículas estuvieran en la misma fase.

Las fases de los receptores cables e hidrófonos fueron ajustados a geófonos. Las trazas sísmicas registradas por el Hidrófono H3 que se encontraban fuera de la convención SEG (Sociedad de Exploradores Geofísicos) con polaridad invertida se les realizó una corrección constante de fase a 180 grados pudiéndose apreciar en la **Figura 4**.

Los tres tipos de fuentes se procesaron teniendo en cuenta la conversión de las fases de los sismogramas de airgun y vibros cuyas ondículas son consideradas como fase cero a fase mínima haciendo coincidir con dinamita ya que teóricamente esta última se adquiere con fase mínima.

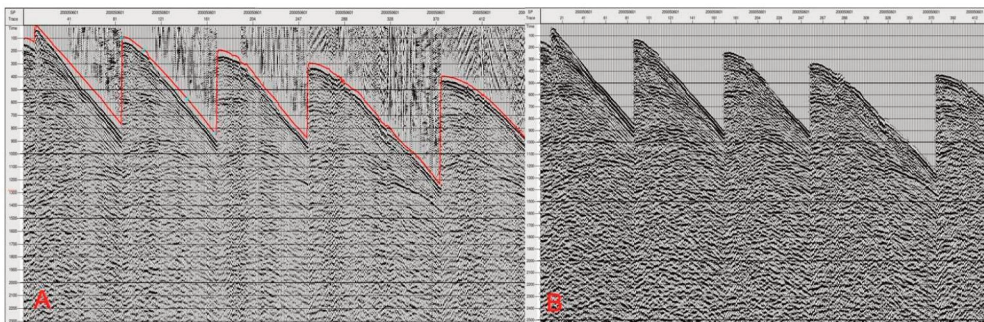


Figura 3. Blanqueo (*Mute*) en los sismogramas, en A) la selección del *mute* y B) el resultado obtenido después de aplicado

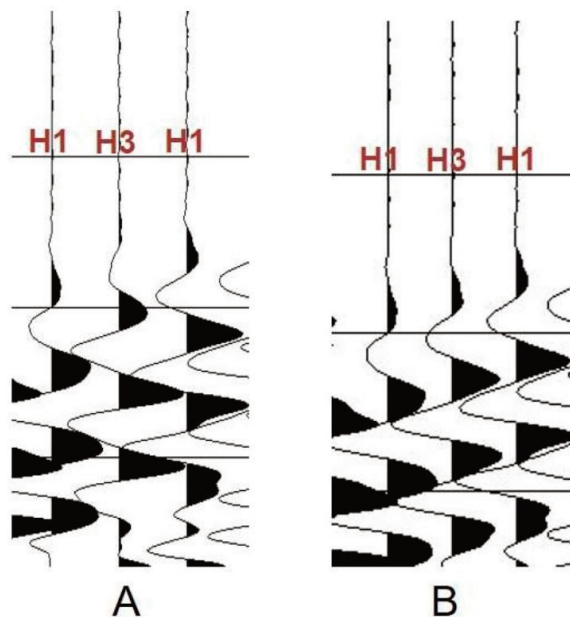


Figura 4. Transformación de fase constante a 180 grados. Traza H3 con polaridad invertida (A) y Traza H3 convertida y alineada con H1 (B)

Estáticas por elevaciones

El cálculo de las estáticas por elevación en la zona de transición mar-tierra se realizó siguiendo el gráfico de la **Figura 5** y que se detallan a continuación.

- 1) Plano de referencia final fue el nivel medio del mar (MSL)
- 2) La fuente dinamita se ubicó sobre la base de su posición en profundidad y se consideró la velocidad de reemplazamiento de 2000 m/s, se obtuvo el retardo en que llegó la onda al receptor.
- 3) La estática por elevación se aplicó tanto para fuentes como para receptores. Las fuentes (vibro y dinamita) que están en tierra, se les calculó su posición de acuerdo a la velocidad de reemplazamiento de 2000 m/s y en mar la fuente (*airgun*) y los receptores (cable e hidrófono), se les calculó la posición teniendo en cuenta la velocidad en el agua, que es de 1535 m/s.
- 4) Las profundidades de las fuentes y las receptoras vienen en el encabezamiento de las

trazas, referidas al nivel medio del mar y con la corrección por la marea determinados por el *software GeoLand* de control de calidad en la adquisición sísmica del año 2007 (Arriaza, 2007).

Atenuación de ruidos lineales, aleatorios y amplitudes anómalas

El campo de onda sísmica útil se encuentra afectado por ruidos coherentes del tipo *ground roll* que contiene un comportamiento lineal con respecto a la distancia fuente-receptor con frecuencias de alrededor de los 10 Hz, aunque en ocasiones pueden llegar hasta los 12 Hz, los cuales poseen altas amplitudes y bajas velocidades. Prevalcen además ruidos de tipo aleatorio, amplitudes anómalas, ruidos originados por fuentes eléctricas y otros. En la **Figura 6A** se presenta un ejemplo de sismograma con la presencia de ruidos lineales y amplitudes anómalas, mientras que en la **Figura 6B** se observa el mejoramiento y la coherencia de los reflectores sísmicos y en la **Figura 6C** resulta el ruido eliminado.

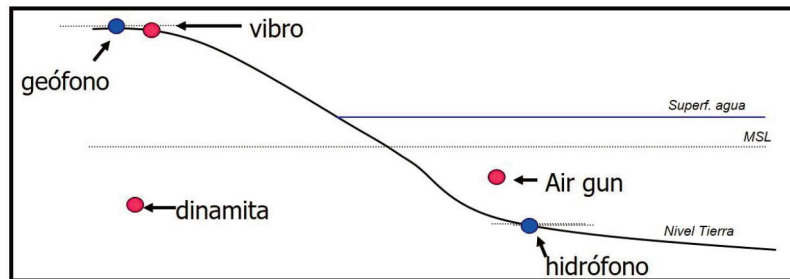


Figura 5. Representación esquemática de la posición de fuentes y receptores en la zona de transición mar-tierra

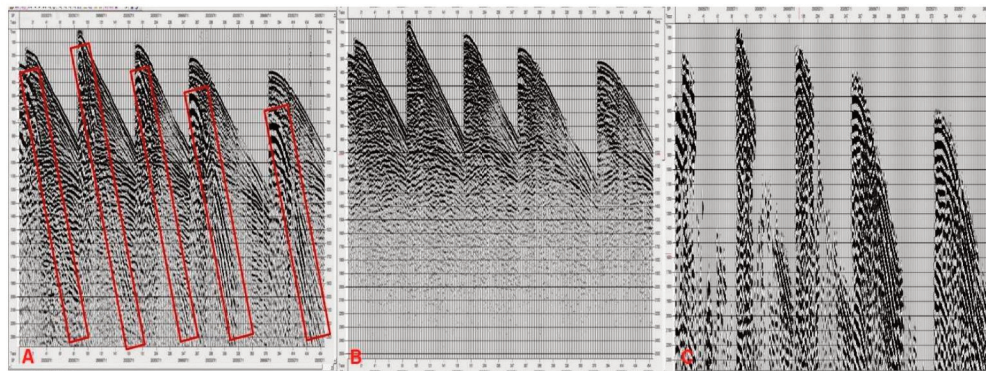


Figura 6. Ejemplo de un sismograma con el ruido *ground roll* presente (A). Con la atenuación del ruido coherente (B). Ruido eliminado (C)

Nivelación de amplitudes y compensación de amplitud y fase. Los sismogramas de *vibros* adquiridos tienen una energía superior con respecto a los sismogramas de *airgun* y dinamita, esto se puede apreciar en las curvas de la relación amplitud y tiempo (Figura 7), observándose un decaimiento de las amplitudes en estas fuentes.

Para nivelar estas amplitudes se hizo necesario aplicar una función matemática (Ecuación 1), que permitió obtener el incremento de la energía que se necesitaba para equilibrar la energía con los sismogramas de *vibro*. En la Tabla 1 se presentan los coeficientes aplicados.

Donde $S_i(t)$ es la muestra en tiempo y (t) es la ganancia de energía en dB

En la Figura 7 se presenta las curvas de la relación amplitud y tiempo de todos los tipos de fuentes pre-

$S_i(t)$ [m/s]	$A(t)$ [db]
100	10^7
900	9×10^6
5000	7×10^6

Tabla 1. Coeficientes de amplitud aplicado a los sismogramas *airgun* y dinamita

sentes. En A) se observa, cómo están las amplitudes después de adquirido el dato sísmico y B) luego de aplicado los coeficientes para nivelar las amplitudes. Esta nivelación de amplitudes se expresa en la sísmica de la siguiente manera (Figura 8). Como resultado se obtiene la uniformidad de las amplitudes en el dato sísmico.

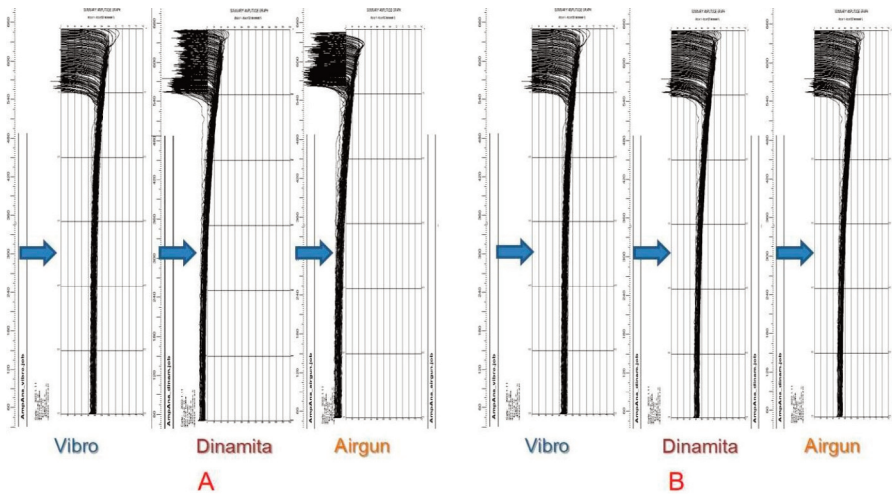


Figura 7. A) Relación de amplitud y tiempo en los datos sísmicos adquiridos por fuentes *vibros*, dinamita y *airgun*, y B) Relación de amplitud y tiempo después de aplicado la función matemática para nivelar las amplitudes

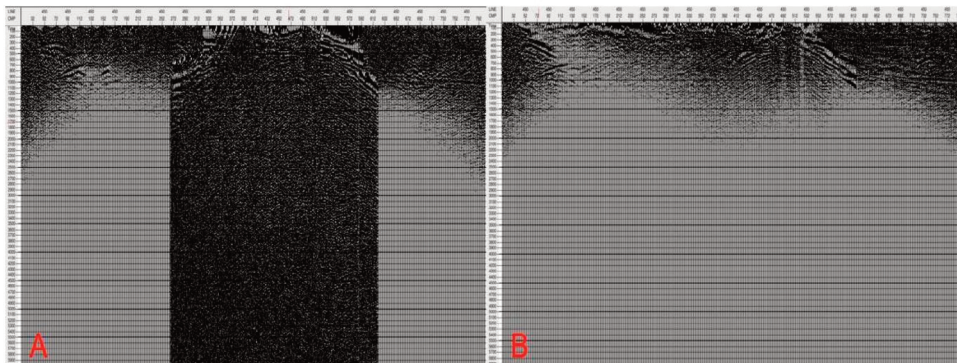


Figura 8. Secciones sísmicas obtenidas antes (A) y después de la nivelación de energía (B)

Luego de la nivelación de amplitudes se aplicaron tres tipos de compensación de amplitudes y uno de fase: compensación por divergencia esférica (Castellano, 2018), compensación del factor de calidad Q en su variante de fase, compensación consistente en superficie y compensación de amplitudes residuales.

Deconvolución

La deconvolución comprime la onda básica del registro en el sismograma, atenúa reverberaciones y períodos cortos de múltiples por lo que incrementa la resolución temporal y el campo de representación de la reflectividad en el subsuelo (Yilmaz Oz, 2001).

Se aplicó:

- 1) La deconvolución consistente en superficie, que es la descomposición de la ondícula en sus componentes de línea, fuente, receptor, *offset* (distancia fuente-receptor) y CMP para la estimación del filtro que será aplicado a cada traza, teniendo en cuenta la preservación de amplitudes.

- 2) Deconvolución predictiva: Antes de comenzar las pruebas de la deconvolución para una sección sísmica, los datos sísmicos fueron sometidos a procesos de auto correlación. Las pruebas de la deconvolución arrojaron los resultados de la **Tabla 2**.

En la **Figura 9** aparecen los resultados obtenidos luego de aplicada la deconvolución, observándose en la parte superior el espectro de amplitudes de los datos sísmicos antes (Data2 en rojo) y después de la deconvolución (Data1 en azul) aumentando el espectro de las amplitudes para frecuencias altas y creando una meseta bien marcada para las frecuencias útiles de estudio. En la parte inferior se presenta la autocorrelación de una sección sísmica sumada, donde se observa mejor como se comprime la ondícula y aumenta el coeficiente de la relación señal/ruido.

Análisis de velocidad de suma y estáticas residuales

La selección de los pares de tiempo- velocidad se rea-

Ventana de aplicación	Distancia predictiva	Longitud del operador	Coefficiente de ruido blanco
0-3500	24	120	1001

Tabla 2. Parámetros utilizados en la deconvolución predictiva

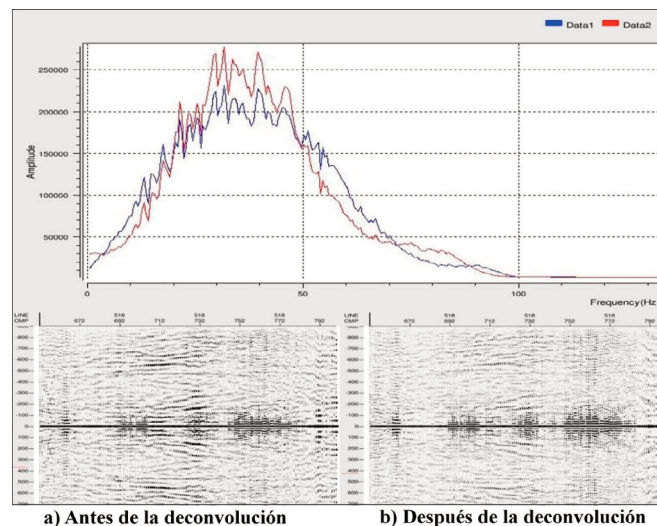


Figura 9. Comparación de los resultados antes y después de la deconvolución

lizó para un intervalo de red de 1 km x 1 km para un total de 3 análisis de velocidad indistintamente en la etapa del pre-procesamiento.

Regulación 5D

La interpolación 5D actúa en 5 dimensiones del dato sísmico, una dimensión temporal y 4 espaciales (in-line/crossline/offset/azimuth) y usa trazas vecinas adquiridas para predecir nuevas trazas en el dato sísmico, mejorando el efecto de la geometría irregular en la adquisición sísmica y el llenado de pequeños espacios vacíos, así como el incremento de la cobertura *offset/azimuth*.

En la **Figura 10** se muestran los resultados de la interpolación 5D. En A) se puede observar en el mapa de cobertura, cómo está distribuida luego de la geometría de la adquisición sísmica teniendo una cobertura total de 120 trazas y en B) obtenemos áreas donde se incrementó de 40 a 100 trazas para una máxima cobertura de 240 trazas, lo que favorece al dato antes de la etapa de migración, ya que mejora la correlación sísmica, homogeneidad y uniformidad dentro del dato sísmico.

2) Etapa de migración

La migración es otro de los procesos principales durante el procesamiento sísmico. Este permite mover los eventos inclinados a su posición verdadera en el subsuelo colapsando las difracciones, lo cual incre-

menta la resolución espacial y el mejoramiento de la imagen sísmica. El objetivo de la migración es hacer una sección sísmica lo más similar posible a una sección geológica del subsuelo (Yilmaz, 2001; Duquet, XU y Lambaré, 2003).

Las migraciones PSTM que se usaron fueron hechas con el método Kirchhoff teniendo en cuenta un medio isótropo y anisótropo del subsuelo, para ellos se realizaron 3 migraciones, primero con la velocidad RMS con un análisis de velocidad de 500 m x 500 m, segundo con la velocidad residual con un análisis de 500 m x 500 m y por último con la utilización del campo de velocidades residuales. Se procedió a realizar un análisis de velocidades anisótropas para así realizar la migración pre-suma en tiempo. Se calculó el campo eta (valores de anisotropía) con el objetivo de corregir las deformaciones de los eventos sísmicos en los offset lejanos con la corrección cinemática (NMO) (Camejo, Tristán, 2009). Los parámetros empleados en la migración se presentan en la **Tabla 3**.

3) Etapa de post-procesamiento

Los datos empleados en la etapa del post-procesamiento son las sumas finales migradas y con mute (blanqueo en las primeras entradas. Se atenuaron los ruidos lineales y aleatorios mejorando la coherencia de los reflectores sísmicos. Luego se utilizó un filtro pasa banda variable en el tiempo con una ventana de aplicación que se muestra en la **Tabla 4**.

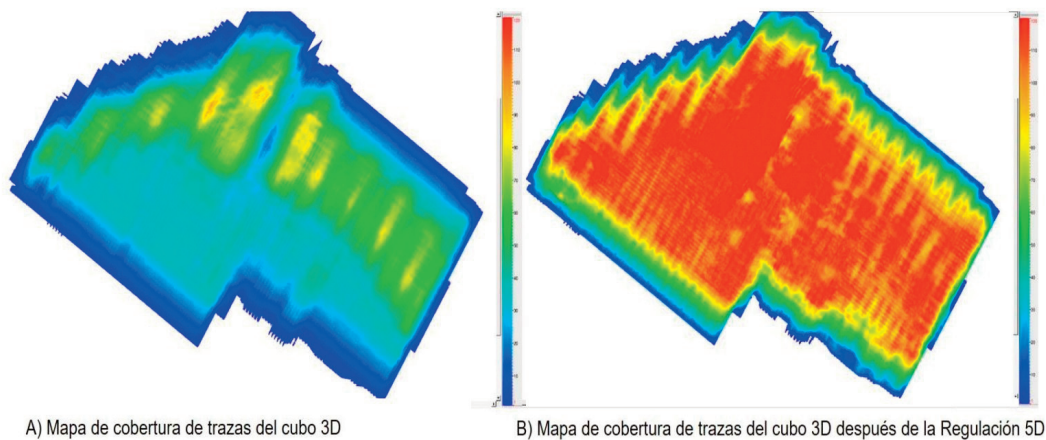


Figura 10. Representación de la cobertura del proyecto 3D antes y después de la interpolación 5D

Parámetros	Valores	
	Tiempo [ms]	Apertura [m]
Apertura de migración	200	1500
	2500	3500
	5000	6500
<i>Antialiasing</i> [m]	12.5	
Máximo ángulo de buzamiento [grados]	70	
Rango de offset [m]	0-4800	
Rango del tiempo de migración [ms]	0-6000	
Intervalo de muestreo [ms]	2	

Tabla 3. Parámetros empleados en la migración pre-suma en tiempo

Ventana de aplicación [ms]	Largo del Operador [ms]	Filtro de frecuencias [Hz]
100-1500	300	6/12-50/60
1800-3000	300	6/12-40/50
3300-5000	300	6/12-30/50

Tabla 4. Parámetros empleados en la migración pre-suma en tiempo

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Cruces de *inline* y *crossline* en el cubo sísmico 3D
 Los resultados que se muestran están procesados con migración pre-suma en tiempo y con anisotropía. En la **Figura 11** se representaron algunas *inline* y *crossline* para mostrar el comportamiento geológico de los ca-

balgamientos, pliegues, fallas y fracturas dentro del cubo sísmico 3D. Además, se puede apreciar la correlación y continuidad de los eventos o reflectores sísmicos tanto en la parte de la cuenca como por debajo de ésta, conservando el patrón estructural correspondiéndose a la geología del área.

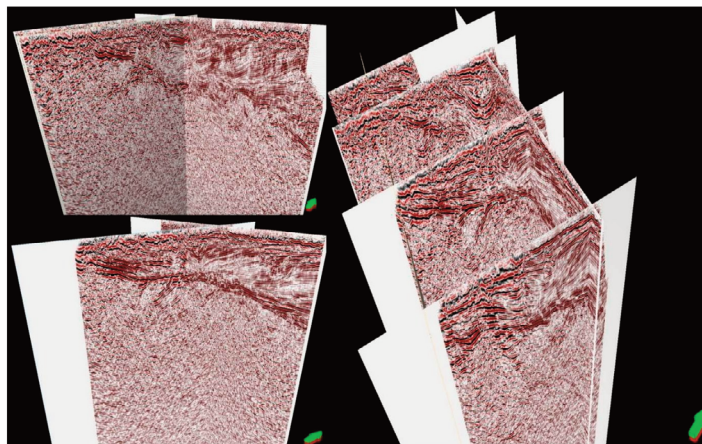


Figura 11. Cruces de *inline* y *crossline* del cubo sísmico 3D de Varadero transicional

-Comparación del nuevo procesamiento con los procesamientos sísmicos anteriores 3D realizados en el área. Los procesamientos sísmicos anteriores 3D no han esclarecido el cuadro geológico estructural por debajo de la cuña de las serpentinitas y en los apilados al norte, además no se ha podido obtener algún resultado exploratorio que avale los recursos invertidos en esta costosa adquisición del año 2007 debido a su poca representatividad del medio geológico. La presencia de la información sísmica interpretable en áreas vecinas al cubo 3D hace pensar que los datos sísmicos pudieran estar limitados en su resolución desde la adquisición sísmica,

lo que pudiera ser susceptible de mejorarse en el procesamiento (Domínguez, Sterling, 2012), no obstante, el nuevo reprocesamiento, objeto de estudio de este informe, responde a que sí es posible mejorar la calidad de los eventos sísmicos, así como la definición de un buen contraste entre las secuencias carbonatadas por encima de los 2s. En las **Figuras 12 y 13**, se observan comparaciones del nuevo reprocesamiento con los procesamientos anteriores (procesamiento inicial realizado en *Geofizyka Torún* del año 2008) y la unión de datos (Sísmica 3D del Bloque 10 y Varadero transicional 3D) realizado por *Geofizyka Torún* en el año 2015.

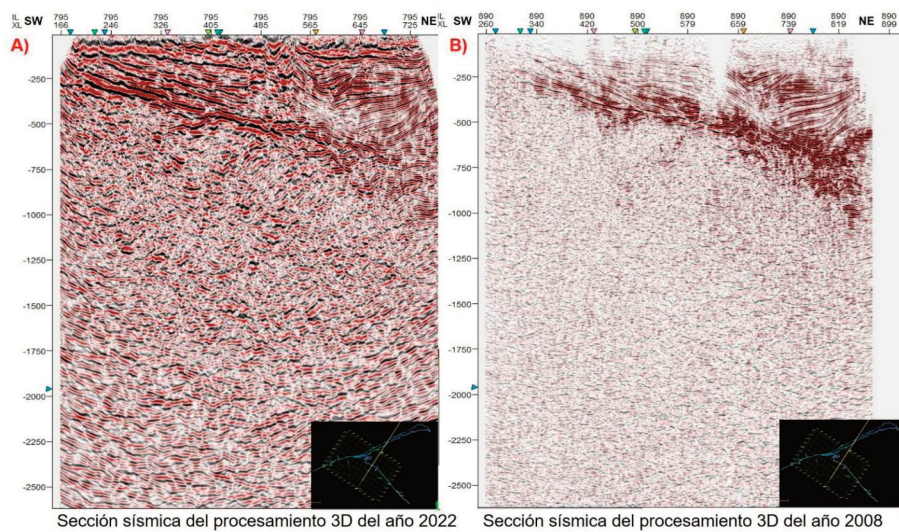


Figura 12. Comparación del procesamiento realizado en la Unidad de Ciencia y Tecnología de Base del Centro de Investigación del Petróleo en el año 2022 y el procesamiento realizado por la compañía de *Geofizyka Torún* en el año 2008.

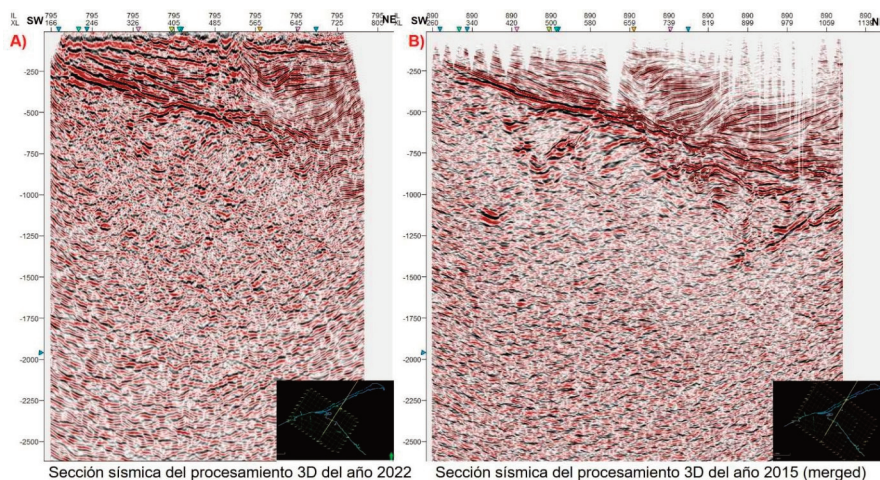


Figura 13. Comparación del procesamiento realizado en la Unidad de Ciencia y Tecnología de Base del Centro de Investigación del Petróleo en el año 2022 y el procesamiento realizado por la compañía de *Geofizyka Torun* en el año 2015.

CONCLUSIONES

- El resultado obtenido en el nuevo procesamiento ofrece una mejor resolución de los datos sísmicos, con respecto a los procesamientos sísmicos de los años 2008 y 2015.
- Se obtuvo una buena diferenciación del cuadro ondulatorio en las inline y crossline del cubo sísmico 3D migradas en presuma en tiempo hasta los 2s, que corroboran estructuras ya existentes y podrían contribuir al reconocimiento de nuevas estructuras a partir de nuevas interpretaciones geólogas-geofísicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arriaza, G.**, 2007, Reporte final del proyecto de adquisición sísmica de Varadero 3D Misión 3D CUB-3431 (Archivo Centro de Investigación del Petróleo).
- Camejo E., Tristán A.**, 2009, Introducción de una metodología para el cálculo de la velocidad y la anelipticidad en el procesamiento de datos sísmicos. 3ra Convención de Ciencias de la Tierra, La Habana.
- Castellano, J.**, 2018, Diseño de una secuencia de procesamiento que permita mejorar la calidad de la imagen sísmica en un sector de Varadero, Cuba. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico. Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría».
- CNPC**, 2015, Exploration Software Corporation, Ltd. GeoEast V3.0.6 User Guide (2D).
- Domínguez G, Sterling N**, 2012, Dictamen técnico sobre propuesta de reprocesamiento de datos sísmicos 3D, Varadero 2007. (Archivo Centro de Investigación del Petróleo).
- Duquet B.; S. Xu y G. Lambaré**, 2003, 3D multirival Kirchhoff versus wave equation migration: SEG/EAGE salt model case study The Leading Edge, 22(10): 969-972.
- Yilmaz, O.**, 2001, Seismic Data Analysis. Processing, Inversion, and Interpretation of seismic data, vol. 1, edición electrónica publicada. Society of Exploration Geophysicists