



Proyecto Yarumo 3D. Adquisición y Procesamiento Datos Sísmicos de Alta Resolución. Cuenca de los Llanos Orientales. Colombia.

Massimo Di Giulio⁽¹⁾, Hermes Garzón⁽²⁾, Ivan Becerra⁽²⁾, Marcela Ortegón⁽²⁾, Raquel Encinas⁽¹⁾, Blas Galiano⁽¹⁾, Oscar Aldana⁽³⁾ y Edgar Villamizar⁽³⁾. CEPSA E&P España⁽¹⁾, CEPSA LATAM Colombia⁽²⁾, NEWNORTH Colombia⁽³⁾

Copyright 2018, ACGGP.

This paper was selected for presentation by an ACGGP Technical Committee following review of information contained in an abstract submitted by the author(s).

Resumen

La adquisición y procesamiento de datos sísmicos de alta resolución en la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia constituye un reto tanto operacional como técnico. Los avances tecnológicos en los equipos de prospección sísmica y las nuevas metodologías de procesamiento contribuyen a incrementar la resolución sísmica de objetivos tanto estratigráficos como estructurales y la generación de imágenes sísmicas que permitan evaluar el potencial de los bloques exploratorios.

Para evaluar el potencial exploratorio de la parte sur del bloque Merecure, en 2017 CEPSA LATAM Colombia y PERENCO adquirieron 162 km² de sísmica 3D correspondientes al proyecto Yarumo 3D. Debido a su complejidad tanto técnica como socio-ambiental fue registrado mediante el uso de *Mini-Vibrators* y sistema de grabación inalámbrico. El equipo y la logística empleada permitieron registrar 3.484 puntos fuentes en menos de tres semanas. Los datos sísmicos fueron de muy buena calidad y se recuperaron frecuencias superiores a 100 hz.

Las operaciones fueron realizadas en los tiempos previstos, cumpliendo con la normativa ambiental y en armonía con las comunidades. El procesado se enfocó en generar una buena imagen tanto de los aspectos estructurales como estratigráficos, además de preservar el contenido de frecuencias. Se emplearon procesos para interpolación 5D, atenuación de múltiples, corrección por anisotropía y un flujo de trabajo adicional para *Diffraction Imaging*.

Estos resultados demuestran que es posible recuperar altas frecuencias en la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia. La calidad de los datos sísmicos facilitó la interpretación y definición de trampas estructurales, estratigráficas y combinadas.

Introducción

Para la evaluación del potencial exploratorio de la parte sur del bloque Merecure CEPSA LATAM Colombia y PERENCO determinaron como objetivo principal la adquisición de un programa sísmico 3D de 162 km². El estudio de la sísmica 2D

adquirida en campañas anteriores muestra que el subsuelo se caracteriza por ser poco complejo estructuralmente y favorecer la recuperación de datos con un contenido de frecuencia alto. Además, dicho estudio concluyó que para definir los posibles objetivos estratigráficos y estructurales se requiere un proyecto de adquisición y procesamiento 3D que cumpla con los siguientes objetivos técnicos:

- Mejora de la relación señal-ruido.
- Alta resolución sísmica.
- Distribución adecuada de *offset* y *azimuth*.
- Análisis de velocidad detallados y procesos de migración robustos.
- Acondicionamiento de los *CDP gathers* para estudios de inversión sísmica.

Para tal fin se consultaron las lecciones aprendidas de campañas recientes realizadas por CEPSA LATAM y se investigaron diferentes técnicas de adquisición y procesado. De esta forma, se estableció una metodología de trabajo idónea, que permitió cumplir con los objetivos planteados.

Localización y Descripción de Área de Estudio

El programa sísmico Yarumo 3D se encuentra ubicado en el margen norte del río Meta, en el extremo oriental del Municipio Trinidad (departamento del Casanare) sobre los cauces de los caños Orocio, Espino y Clarita. El proyecto tiene influencia sobre tres veredas: Palmarito, Lagunitas y Zambrano (Figura 1).

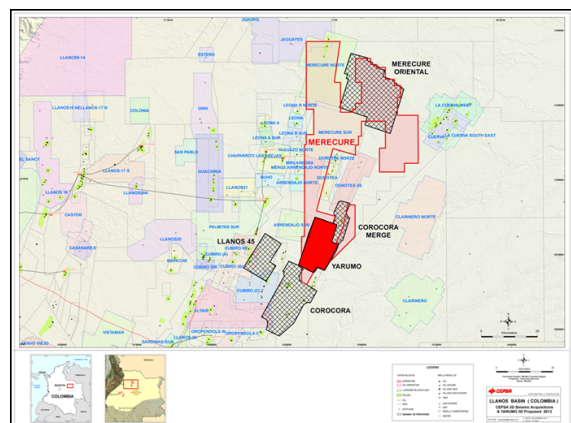


Figura 1: Localización del área de estudio. En color rojo el área del programa sísmico Yarumo 3D.

El relieve se caracteriza por extensas llanuras, bosques de galería, esteros, lagunas, caños y morichales, los cuales, contemplan una gran variedad de flora y fauna. La mayor elevación registrada en el área del proyecto fue de 135,45 m s. n. m y la menor de 116,11 m s. n. m. (Figura 2).

La temporada de lluvia se presenta de abril a octubre y la temporada seca de diciembre a marzo, dicha temporada se caracteriza por fuertes vientos y bajas temperaturas en horas de la noche. La temperatura promedio en el Municipio de Trinidad es de 26,7°C.



Figura 2: Relieve característico del área de estudio. Nótense las llanuras y las condiciones del terreno. Al fondo se observan las zonas de morichales.

Metodología

En campañas realizadas en 2013, en dos bloques de la cuenca de los Llanos Orientales, CEPESA LATAM Colombia implementó una serie de técnicas con el objetivo de mejorar la calidad de los datos sísmicos. Las Campañas de Siruni 2D y Peguita 3D demostraron que en zonas con poca complejidad estructural y con objetivos geológicos entre someros y profundos fue posible obtener datos con un contenido de frecuencia alto empleando como fuentes primarias tanto *Mini-Vibrators* y material explosivo tipo SISMIGEL PLUS® además del uso de geófonos convencionales con frecuencia natural de 10 Hz. PETROSEISMIC (2013). Las lecciones aprendidas en dichas campañas junto con las técnicas propuestas para el diseño y procesamiento de programas sísmicos establecidas por Pritchett (1999), Cordsen et al. (2000) y Vermeer (2012) permitieron establecer las bases del proyecto de adquisición y procesamiento Yarumo 3D.

La Metodología de trabajo empleada se resume a continuación:

- a) Se compiló la información disponible acerca de las lecciones aprendidas en las campañas de Siruni 2D y Peguita 3D. Además, de las técnicas para la

adquisición y procesamiento de datos sísmicos de alta resolución.

- b) Se evaluaron diversas opciones de diseño 3D con especial atención en los efectos de las restricciones socioambientales sobre los atributos geométricos. Además, se realizó la optimización de los parámetros del diseño seleccionado con el fin de mejorar la distribución de *offset* y *azimuth*.
- c) Se estudiaron las diversas opciones de fuente sísmica. Para tal fin fueron evaluados los aspectos técnicos y socioambientales. Para las estaciones receptoras se prefirió el sistema inalambrico.
- d) Se generó una propuesta para la adquisición de una línea de prueba 2D con el objetivo de definir los parámetros de fuentes y receptores más idóneos a emplear durante la etapa de producción.
- e) Se elaboró una secuencia de procesamiento donde se establecieron los módulos necesarios para la migración pre-apilamiento (*PSTM*) y el acondicionamiento de los *CDP gathers* para la inversión de datos sísmicos. Además se incluyó el requerimiento para realizar un procesamiento tipo *Diffraction Imaging*.

Diseño del Programa Sísmico Yarumo 3D

La opción de diseño seleccionada para el pre plot correspondió a un 3D Ortogonal, Triple *Stagger* y *Wide Azimuth*. El Triple *Stagger* fue empleado durante la etapa de optimización para mejorar el muestreo tanto de *offset* como *azimuth*. Para favorecer la recuperación de frecuencias y reducir el efecto de *footprint*, se incrementó la densidad de trazas por km² reduciendo el intervalo entre líneas receptoras. La configuración del *Template* de adquisición se fijó en un intervalo de *aspect ratio* entre 0,75 y 0,85 con el fin de favorecer el muestreo simétrico del campo emergente de onda. Debido a los aspectos económicos se escogió un *bin size* rectangular que sería posteriormente modificado durante el procesamiento a un bin cuadrado. La distribución de cobertura a distintos rangos de *offset* se consideró como idónea para muestrear las diferentes formaciones geológicas de interés en el área de estudio. La cobertura nominal *pre plot* fue de 50 (Tabla 1).

Debido a la complejidad socioambiental del proyecto el diseño fue cambiado varias veces hasta lograr obtener una distribución de cobertura, *offset* y *azimuth* acorde con las especificaciones técnicas establecidas. Se identificaron y delimitaron más de 50 zonas de exclusión, primero mediante imágenes de satélite y luego en campo. Por tal motivo, fue necesario el desplazamiento de más del 40% de los puntos fuentes planteados. Las distancias de seguridad ambientales establecidas para morichales, lagunas, esteros y nacederos fue de 200 m. Debido al desplazamiento de los puntos fuentes el fold máximo obtenido fue de 98. Para mitigar los efectos en la distribución de los atributos geométricos se preservó la posición de las estaciones receptoras y se estableció un

procedimiento para el desplazamiento de los puntos fuentes (Figura 3).

Descripción	Parámetros
Tipo de Diseño	Ortogonal/Triple <i>Stagger</i>
Intervalo entre Estaciones Receptoras	50 metros
Intervalo entre Puntos Fuentes	100 metros
Intervalo entre Líneas Receptoras	200 metros
Intervalo entre Líneas Fuentes	500 metros
Total de Puntos Fuentes Sismigel	103
Total de Puntos Fuentes Vibrados	3381
Total de Estaciones Receptoras	16154
Número de Líneas activas por Fuente	20
Canales por Línea	100
Número Máximo de Canales	2000
Tipo de Tendido	Simétrico <i>Roll On/Roll Off</i>
<i>Fold</i> Nominal	50 <i>pre plot</i> /98 <i>post plot</i>
<i>Offset</i> Mínimo	17.68 metros
<i>Offset</i> Máximo	3705 metros
Máximo <i>Offset Inline</i>	2475 metros
Máximo <i>Offset Crossline</i>	1950 metros
Tamaño del <i>Bin</i>	25 X 50 metros

Tabla 1: Parámetros seleccionados para el Diseño 3D.

Además, durante el procesamiento se incluyeron módulos que permitieron regularizar y minimizar los *gaps* en la distribución de los atributos geométricos.

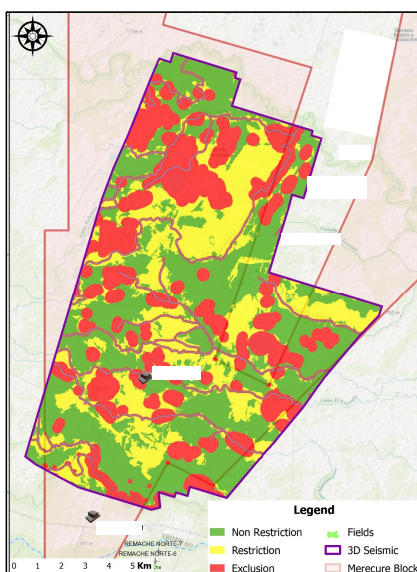


Figura 3: Mapa con las zonas de exclusión (en color rojo).

Las condiciones del terreno, las características de los objetivos geológicos, los aspectos socioambientales y las lecciones aprendidas en programas anteriores se consideraron favorables para proponer el empleo de *Mini-Vibrators* como fuente primaria y el material explosivo tipo SISMIGEL PLUS® como secundaria. PETROSEISMIC (2013). Ejemplos relacionados con la adquisición de datos sísmicos de alta resolución mediante el uso de *Mini-Vibrators* en la cuenca de los Llanos Orientales se presentan en el trabajo de Di Giulio et al. (2016).

Programa Sísmico Yarumo 3D

El programa sísmico Yarumo 3D fue adquirido de diciembre 2016 a marzo 2017 por la contratista VECTOR Geophysical S.A. Para la supervisión técnica del proyecto se contó con los servicios de la compañía NEWNORTH Colombia.

Durante las operaciones se registraron 3.484 puntos fuentes, distribuidos en 48 líneas para un total de 346 km. Como fuente de energía primaria se emplearon *Mini-Vibrators*. De un total de 3.484 puntos fuentes fueron adquiridos mediante Mini Vibrators 3.381 (97,04%) y mediante fuente secundaria material explosivo tipo SISMIGEL PLUS® 103 (2,96%). Además, se emplearon 16.154 estaciones receptoras, distribuidas en 93 líneas con una longitud total de 807,8 km.

La ejecución del proyecto se caracterizó por el cumplimiento de las normas técnicas, sociales, ambientales y de seguridad establecidas para el programa sísmico. Además, las operaciones fueron realizadas en los tiempos estipulados. Cabe destacar que una de las mayores limitaciones del área de estudio, lo constituyó, la presencia de una gran cantidad de elementos socio-ambientales. La caracterización y delimitación de dichos elementos fue realizada en función a las normas establecidas por CORPORINOQUIA.

Se instalaron dos campamentos volantes ubicados estratégicamente en el área de operaciones para garantizar el soporte a todas las actividades del proyecto. Fueron ubicados en los predios El Campin y Matemango. Uno de los campamentos fue acondicionado para servir como oficina principal de registro y adquisición de datos sísmicos. De esta forma, no fue necesario el empleo de un camión de grabación, ya que la oficina principal de registro, se encontraba en uno de los campamentos volantes.

Las operaciones de corte y nivelación se iniciaron el 05 de enero 2017 con la instalación de la Red de GPS. Se requirieron de 48 días de trabajo efectivo para posicionar los puntos fuente y las estaciones receptoras. El promedio de producción por grupo fue de 4,42 km/día. Mediante el sistema convencional se replanteó el 11% de la totalidad de los puntos del programa sísmico, el RTK contribuyó con el 71% y para el restante 12% fue empleado el STAR FIRE NAVCOM. Este último, fue una novedad en el proyecto. El STAR FIRE NAVCOM permitió nivelar sectores y tramos puntuales donde no había cubrimiento de la master RTK permitiendo el desarrollo continuo de las actividades sin afectar la programación diaria. VECTOR Geophysical (2017).

Las operaciones de perforación se iniciaron el 05 de febrero 2017. Durante 14 días de trabajo efectivo fueron perforados y cargados 103 pozos en zonas donde no fue posible el ingreso de los *Mini-Vibrators*. El promedio de producción fue de 7,35 SP/día. VECTOR Geophysical (2017).

Las operaciones de registro se iniciaron el 14 de febrero 2017 con los trabajos de regada de material. En 19 días de trabajo efectivo fueron registrados los 3.484 puntos fuentes del proyecto. El promedio de producción diario fue de 183,37 VP/día. VECTOR Geophysical (2017).

Se emplearon como fuente primaria dos flotillas de *Mini-Vibrators* IONOVA UNIVIB PLS-326[®] cada una compuesta por dos unidades y una en espera (Figura 4). En caso de presentarse algún problema con el funcionamiento de una de las fuentes es sustituida por la de espera para que la producción diaria no fuese afectada. Como fuente secundaria, se empleó material explosivo tipo Sismigel Plus[®] en zonas donde no fue posible el ingreso de las flotillas de *Mini-Vibrators*.



Figura 4: Mini-Vibrators durante las operaciones de registro.

Se seleccionó el equipo inalámbrico eUNITE SERCEL 3.0[®] que es compatible con el sistema de grabación eSERCEL 428XL[®] para la operación de registro. En las posiciones correspondientes a las estaciones receptoras, fueron colocadas unidades de adquisición remota RAU eX-3[®] (Figura 5). Estas, a su vez, fueron conectadas a los arreglos de geófonos. La combinación entre las RAU y los arreglos de geófonos conformaron los canales en cada una de las líneas receptoras del programa sísmico (Tabla 2). Las unidades RAU fueron programadas para estar activas durante un determinado número de horas diarias y en ellas, se almacenaron los datos provenientes de los arreglos de geófonos. La descarga de datos, se realizaban cada 48 horas mediante las unidades portátiles REAPER[®].

Una de las limitaciones del sistema de grabación consistía en la ausencia de QC en tiempo real. Para solventar esta situación se realizó diariamente la descarga de una muestra de datos provenientes de las unidades RAU. Las muestras eran revisadas en la oficina principal de registro y adquisición de datos sísmicos ubicada en uno de los campamentos volantes.

Los equipos y la logística empleada en las operaciones de registro permitieron realizar los trabajos con rapidez y efectividad.



Figura 5: Unidades de adquisición remota RAU eX-3[®].

Descripción	Parámetros
Sistema	eUNITE SERCEL Inalámbrico (compatible con 428XL)
Unidad Remota de Adquisición	RAU eX-3
Intervalo de Muestreo	1 mseg
Longitud del Registro	6 seg
Filtro de Corte Bajo	Fuera
Filtro de Corte Alto	0,8 Nyquist
Filtro <i>Notch</i>	Fuera
Formato de Grabación	SEGD
Tipo de Geófono	SMT24
Frecuencia Natural	10 ± 2,5%
Arreglo de Geófonos	Lineal Simétrico/Centrado en la Estaca
Número de Geófonos	6
Intervalo entre Geófonos	4 metros
Longitud del Arreglo de Geófonos	20 metros

Tabla 2: Parámetros seleccionados para la grabación.

El programa sísmico incluyó también un grupo de trabajo a dedicación exclusiva para la adquisición de datos sísmicos de refracción. Los resultados, fueron empleados durante la etapa de procesamiento, para realizar la calibración de las correcciones estáticas. La compañía NEWNORTH se encargó de adquirir, procesar e interpretar los datos de refracción sísmica.

Línea de Prueba y Definición de Parámetros

A principios de febrero 2017 se registró en la parte sur del bloque exploratorio, 2 líneas experimentales 2D, para definir los parámetros de fuentes y receptores a emplear durante la etapa de producción. Se escogió una zona que representara la topografía dominante en el proyecto.

La línea de prueba estaba conformada por una línea de 8 km en la dirección *inline* y otra de 2 km en la dirección *crossline*. Las estaciones receptoras en la *inline* presentaban un arreglo de geófonos lineal-centrado en la estaca y otro agrupado. Cada uno estaba compuesto por 6 geófonos convencionales. El mismo esquema se aplicó en la dirección *crossline*. El intervalo entre receptoras fue de 50 m y entre puntos fuente de 100 m. El diseño de las líneas permitió también simular el *offset* máximo en ambas direcciones.

Para los puntos fuentes se establecieron una serie de pruebas para determinar los parámetros de los *Mini Vibrators*. Para el diseño de pruebas se empleó el esquema recomendado por Pritchett (1999) y Cordsen et al. (2000). Se realizaron pruebas para determinar la longitud del barrido, frecuencia del barrido, número de barridos, número de *Mini-Vibrators* por punto fuente, *Peak Force*, *taper* y tipo de barrido. Para este último se realizaron pruebas con barridos lineales y no lineales (logarítmico).

El análisis de los registros y apilados concluyó que la siguiente combinación de parámetros es la más idónea para cumplir con los objetivos planteados en el programa 3D:

- a) Arreglo de geófonos lineal-centrado en la estaca. A nivel de registro atenuaron componentes de ruido generado por las ondas superficiales (*ground roll*) y mostraron eventos con una mejor relación señal ruido. En los espectros de amplitud, se observó una mejor recuperación de ciertas componentes de frecuencias, que se encuentran más atenuadas en los arreglos agrupados.
- b) Flota de 2 *Mini Vibrators* por punto fuente, 4 barridos, frecuencia de 8-128 hz, *Peak Force* del 75%, *taper* de 300 milisegundos y barrido de tipo lineal (Tabla 3). Los apilados mostraron una buena definición de los eventos y un contenido de frecuencias alto (>100 hz) que favorece la resolución sísmica. FIG XX. Comparando los dos tipos de barrido empleados durante las pruebas, se evidenció, que los registros asociados con barridos logarítmicos presentan menos atenuadas las altas frecuencias, pero presentaron una considerable pérdida de las bajas frecuencias FIG XX. Respecto a los barridos no lineales se recomendó que para futuros proyectos se diseñaran barridos logarítmicos en conjunto con los fabricantes de los *Mini Vibrators* para mejorar el contenido de bajas frecuencias en los espectros. Otro de los factores a destacar fueron las condiciones del terreno que favorecieron un buen acople entre la plancha de los *Mini-Vibrators* y el suelo.

Descripción	Parámetros
Marca	IONOVA
Modelo	UNIVIB PLS-326
Número de <i>Mini-Vibrators</i>	5
Número de <i>Mini-Vibrators</i> en operación	4
<i>Peak Force</i>	26.000 libras
Dimensiones	3 metros de alto/1.92 de ancho/6,32 metros de largo
Número de <i>Mini-Vibrators</i> por punto	2
Tipo de Barrido	Lineal
Número de Barridos	4
Frecuencia de Barridos	8-128 Hz
Longitud del Barrido	12 seg
Tiempo de Escucha	6 seg
<i>Taper</i> inicial/final	300 mseg
Tipo de <i>Taper</i>	Coseno

Tabla 3: Parámetros seleccionados para los puntos fuente con *Mini-Vibrators*.

- c) Para los puntos fuentes con material explosivo tipo SISMIGEL PLUS® se decidió trabajar con parámetros empleados en programas anteriores y que dieron buenos resultados respecto al contenido de frecuencias. Se revisaron también los resultados de las refracciones adquiridas en el proyecto para tener información acerca de las características de la capa meteorizada y elegir la profundidad de pozo más idónea (Tabla 4).

Descripción	Parámetros
Material	SISMIGEL PLUS
Profundidad del Pozo	10 metros
Profundidad a tope de Carga	9,50 metros
Número de Pozos	1
Número de Detonadores por Pozo	2
Cantidad de Carga	900 gramos

Tabla 4: Parámetros seleccionados para los puntos fuente con material explosivo tipo SISMIGEL PLUS®.

Resultados del Programa Sísmico Yarumo 3D

En general los registros son de excelente calidad. Se observaron eventos con buena continuidad, primeros quiebres bien definidos tanto en *offsets* cercanos como lejanos y buen contenido de frecuencia. En los registros adquiridos mediante fuente tipo *Mini Vibrators* el rango de frecuencia de interés fluctúa entre los 18 y 120 hz con frecuencias dominantes de 20 a 80 hz. En cambio los datos relacionados con fuente tipo SISMIGEL PLUS® presentó un rango de frecuencia de interés entre los 15 a 60 hz (Figura 6).

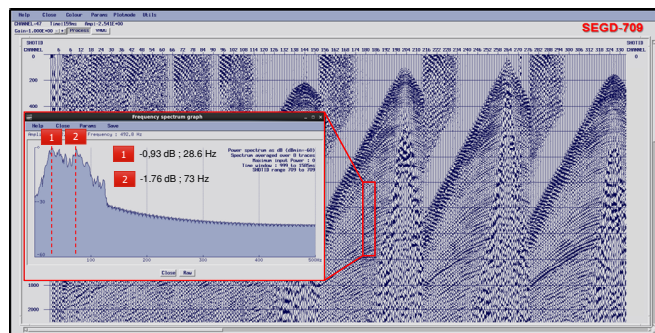


Figura 6: Registro adquirido con fuente tipo *Mini-Vibrator*. Nótese el contenido de frecuencia y la buena calidad de los datos sísmicos.

La relación señal ruido fue buena tanto a nivel de registro como apilado. Se observó una disminución de dicha relación hacia la parte norte del programa y en las zonas próximas a los caños. La causa de esta disminución está asociada a la presencia de arenas poco consolidadas en la parte somera. Dichas arenas, no permiten un acople idóneo tanto de la plancha de los *Mini-Vibrators* como del material explosivo SISMIGEL PLUS® generando la disipación de la energía.

Las principales fuentes de ruido identificadas durante la grabación del programa están relacionados con fuertes vientos,

el movimiento de grandes lotes de ganado y el tránsito de vehículos en el área del proyecto. Se identificó en casos muy puntuales, los efectos generados en los registros, por leves temblores asociados a movimientos telúricos producidos en zonas distantes al programa sísmico.

Para mitigar los efectos de dichas fuentes de ruido se identificó una ventana de grabación durante el día, en la cual, disminuía la intensidad del viento y el tráfico de vehículos en el área de operaciones. Además, debido a la imposibilidad de poder realizar el QC en tiempo real, se reforzó la señal mediante el empleo dos *Mini-Vibrator* y realizando 4 barridos en cada uno de los puntos fuente.

Procesado del Programa Sísmico Yarumo 3D

La compañía ABSOLUTE IMAGING se encargó del procesamiento de los datos adquiridos en el programa sísmico Yarumo 3D. Además, se incluyeron los datos sísmicos de otro programa 3D adquirido anteriormente y con un área aproximada de 40 km². Los principales objetivos planteados durante la etapa de procesamiento fueron los siguientes: obtener una imagen sísmica que permita definir los aspectos estratigráficos y estructurales, preservación del contenido de frecuencia de los datos, *Merge* entre dos programas sísmicos y acondicionamiento de los *CDP gathers* para realizar estudios de inversión sísmica.

Para el procesamiento de los dos programas se decidió dividir los trabajos en dos fases. La primera consistió en las generación de los PSTM *Stand Alone* de cada uno de los programas y la segunda el *Merge* entre ambos. A partir del *Merge*, se generaron una serie de productos sísmicos a emplear durante los trabajos de interpretación. En la Figura 7 se presenta el esquema aplicado para el procesamiento de los datos.

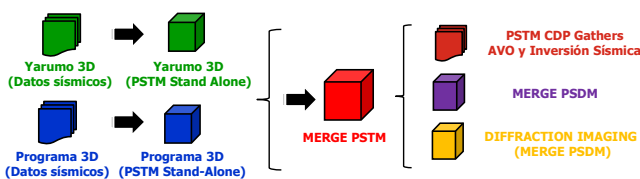


Figura 7: Esquema para el procesamiento de los datos sísmicos.

Retos asociados con la etapa procesamiento:

- a) Cálculo de correcciones estáticas.
- b) Preservación del contenido de frecuencias.
- c) Interpolación 5D y *Merge* entre dos programas sísmicos con distintos parámetros.
- d) Análisis de velocidad.
- e) Corrección por Anisotropía *Vertical Transverse Isotropy* (VTI).
- f) Atenuación de Múltiples.

- g) Definición de aspectos estructurales y estratigráficos mediante PSTM.
- h) Atenuación de *Footprint*.
- i) Acondicionamiento de los PSTM *gathers* para estudios de inversión sísmica.

Se realizaron pruebas con diversos módulos para el cálculo de las correcciones estáticas. Las diferencias entre el método de GLI y Tomografía fueron pequeñas pero, los resultados asociados a la Tomografía generaron las correcciones más idóneas. Para calibrar el modelo de *Near Surface* se emplearon las refracciones adquiridas en el programa sísmico. Durante los procesos de atenuación de ruido y Deconvolución *spiking* consistente con superficie se prestó especial cuidado en la preservación del contenido de frecuencias adquirido en campo (Figura 8).



Figura 8: Ejemplo del contenido de frecuencia en una inline del proyecto. La línea de color verde muestra los resultados luego de aplicar la migración post-apilado. Se recuperan frecuencias superiores a los 100 hz.

Se realizó el proceso de *Merge* entre Yarumo 3D y el otro programa sísmico disponible. Además, se cambió el tamaño del *bin size* natural de 25 x 50 m a *bin* cuadrado de 25 x 25 m. Para equilibrar el contenido de frecuencia entre ambos programas fue necesario mejorar el contenido de frecuencias del otro programa ya que había sido adquirido mediante fuente tipo SISMOGEL PLUS®. Los resultados del *Merge* se consideraron como buenos ya que se observa una buena continuidad de los eventos en la zona de solape entre ambos programas sísmicos.

Se aplicó la interpolación 5D para regularizar la distribución de los atributos geométricos 3D y rellenar algunos de los *gaps* generados por las zonas de exclusión. Otro de los beneficios de la interpolación 5D, fue contribuir a disminuir el ruido asociado a los procesos de migración pre-apilado (Figura 9).

Se realizaron análisis de velocidad detallados. Durante los análisis de velocidad, se detectó el *hockey stick effect* en los *offsets* lejanos asociados a los eventos que se encuentran por debajo del tope de la Fm. León. Para atenuar este efecto, se aplicó la corrección por anisotropía VTI. Fueron detectados una serie de múltiples, principalmente por debajo de la Fm.

León. Se realizaron diferentes pruebas con el módulo de *Radon Transform* que permitieron la atenuación de los múltiples (Figura 10).

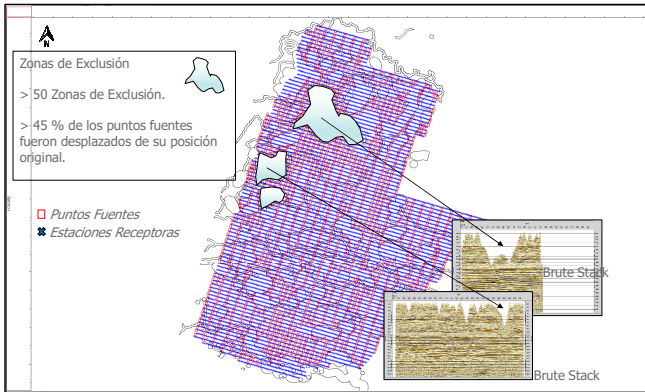


Figura 9: Efectos de las zonas de exclusión en los apilados.

Se aplicó también el módulo de atenuación de Footprint principalmente en los niveles someros y medios. Para la migración pre-apilado de los datos se realizó previamente, mediante la interpolación 5D, la regularización de los datos para favorecer el proceso de migración y se efectuaron una serie de pruebas de parámetros de migración, para obtener la mejor definición de los aspectos estructurales y estratigráficos (Figura 11).

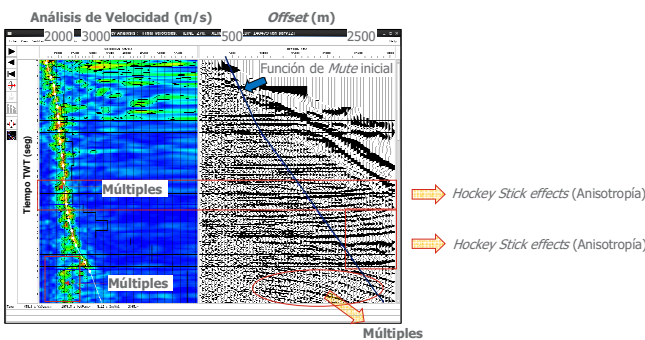


Figura 10: Análisis de velocidad donde se muestran los múltiples y el efecto de *hockey stick* en los offset lejanos.

Para los procesos de acondicionamiento de los *PSTM gathers* se generó primero una secuencia de procesamiento adicional para preservar las amplitudes y luego se aplicaron los siguientes módulos: atenuación de ruido, *radon transform multiple attenuation*, corrección VTI, análisis de velocidades residuales y el proceso de *gather flatening*. Finalmente, los *PSTM gathers* obtenidos se consideraron idóneos para los estudios de inversión sísmica.

Los productos sísmicos *PSTM Stand Alone* y *Merge* muestran reflectores con buena definición y continuidad. Se observan unos eventos fuertes y profundos. Dichos eventos presentan un buzamiento hacia el este y podrían estar asociados con el basamento (Figura 12).

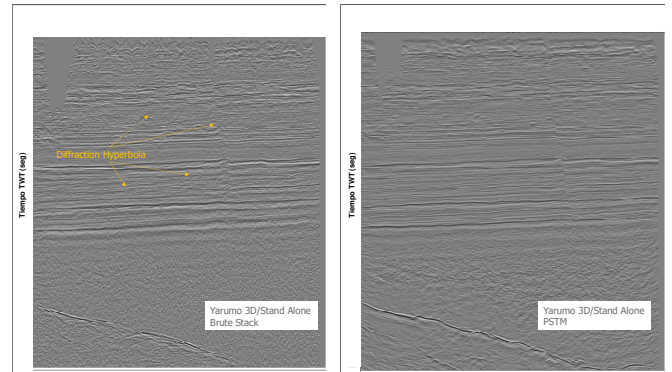


Figura 11: *Inline* no migrado (*Brute Stack*) vs. *Inline* migrado (*PSTM*). Nótese la gran cantidad de *Diffraction Hyperbolas* asociadas con aspectos estructurales y estratigráficos. El *PSTM* muestra una imagen sísmica de buena calidad y alta resolución.

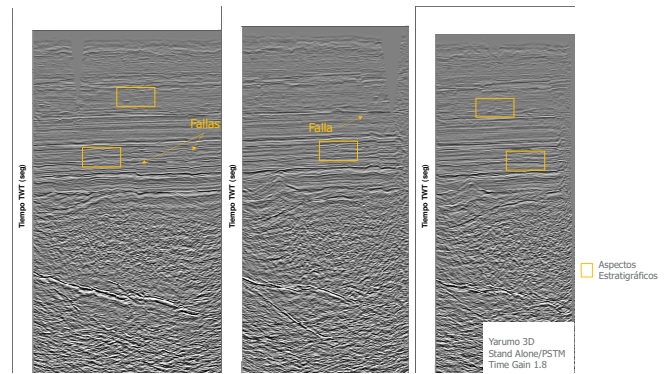


Figura 12: *Inlines* con migración pre-apilado (*PSTM*). Se observa una buena definición y continuidad de los eventos. Nótese los aspectos estructurales y estratigráficos. Se aprecia un evento fuerte y profundo que podría estar asociado al basamento.

La resolución del *PSTM* y del *Merge* facilitó el trazo de las fallas desde los eventos profundos hasta los eventos más someros, diferenciado *plays* de tipo estructural, estratigráfico y combinados que ayudaron a definir la prospectividad del área.

Conclusiones

La metodología de trabajo empleada permitió cumplir con los objetivos técnicos del proyecto Yarumo 3D. Los trabajos realizados tanto en adquisición como procesamiento generaron una serie de productos sísmicos de buena calidad y alta resolución sísmica.

La calidad del 3D *PSTM Stand Alone* y 3D *Merge* facilitaron la interpretación y definición de los aspectos estructurales y estratigráficos de los objetivos de interés, contribuyendo de esta forma, a la evaluación del potencial exploratorio en la parte sur del bloque Merecure.

Agradecimientos

El autor desea agradecer a CEPSA E&P España y CEPSA LATAM Colombia por el apoyo brindado para publicar este trabajo. Especial agradecimiento al grupo de profesionales de CEPSA, VECTOR Geophysical y ABSOLUTE IMAGING por el trabajo realizado durante el proyecto Yarumo 3D.

Referencias

- Pritchett, W. 1990, *Acquiring Better Seismic Data*, Chapman and Hall, Second edition, 428 p.
- Cordsen, A., M. Galbraith and J. Pierce, 2000, *Planning Land 3D Seismic Surveys*, SEG Geophysical Developments N°9, 204 p.
- Vermeer, G., 2012, *3D Seismic Survey Design*, SEG Geophysical Reference series N° 12, Second edition, 369 p.
- PETROSEISMIC SERVICES S.A. Informe Final de Operaciones. Programa Sísmico Siruni 2D. Bogotá; 2013.
- PETROSEISMIC SERVICES S.A. Informe Final de Operaciones. Programa Sísmico Peguita 3D. Bogotá; 2013.
- Di Giulio, M., J. Garzón, H. Garzón y I. Becerra, 2016, "Levantamiento Sísmico Siruni 2D. Datos de alta resolución para objetivos someros. Cuenca de los Llanos Orientales Colombia." Memorias XII Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. ACGGP, Bogotá.
- VECTOR GEOPHYSICAL S.A.S. Informe Final de Operaciones. Programa Sísmico Yarumo 3D. Casanare; 2017.