

Modelado, diseño y adquisición de datos sísmicos 4D-3C-HR utilizando sismómetros de última generación en un campo de producción de la Cuenca Petrolera de Veracruz México.

Ávila-Carrera Rafael^{*1}; Escobar-Soto Luis Manuel²; Constante-Galván Humberto¹; González-Flores Ernesto¹; Solano-Bahena René¹; Téllez-Quijano Marco Aurelio¹; Ourabah Amine³ y Villamizar Victor³

^{1.} Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cardenas 152, C. P. 07730, Ciudad de México, México.

^{2.} Seis Globe / Nodal Geoservices de México.

^{3.} STRYDE Inc. Houston Texas, USA.

^{*} Autor de correspondencia

Resumen

La prospección sísmica sigue siendo la tecnología más exitosa y resolutiva para la identificación y evaluación de las propiedades físicas de los yacimientos y la toma de decisiones en la producción de aceite y gas. Por otro lado, los campos petroleros no cuentan con modelos de caracterización dinámica actualizados, mismos que pueden crearse con apoyo de la imagen sísmica 3D, midiendo en periodos determinados de tiempo y monitoreando la estructura del subsuelo y sus cambios en las características geológico-petrofísicas. Se requiere observar cómo estas características cambian con el tiempo y verificar el modelo dinámico. Idealmente, se deben repetir las adquisiciones sísmicas 3D. Esto es, sísmica 4D convencional. Sin embargo, resulta ser muy costoso, requiere mucho esfuerzo logístico y organizacional en las brigadas, es lento (requiere de la repetición de una línea base sismológica) y además, puede tener gran impacto ambiental.

En el presente trabajo se muestran cálculos estadísticos *pre-plot* y *post-plot* del diseño de adquisición, así como un panorama general de los aspectos operativos durante la adquisición de datos sísmicos 4D-3C de alta resolución (*HR*) en un campo de producción de aceite al sur de México. Este levantamiento sismológico plantea una nueva forma de realizar adquisiciones sísmicas más rápidas y menos invasivas con la sociedad y el medio ambiente. En este estudio se emplearon 1200 nodos STRYDE basados en un

sensor acelerómetro piezoeléctrico de una sola componente, con un amplio rango dinámico y respuesta plana en un rango de 1 Hz a 125 Hz, cada nodo contiene suficiente batería y capacidad de almacenamiento de datos para permitir una grabación autónoma continua hasta por 28 días. La adquisición de datos fue realizada por la empresa operadora Seis Globe Geoservices S.A. de C.V., en un campo de la Cuenca Petrolera de Veracruz, bajo la supervisión del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). En este artículo se presenta una discusión de los modelos de adquisición inicial y el modelo de adquisición ajustado final, mediante análisis de cubrimiento (*full-fold*), de azimuth y trazado de rayos. Se muestran resultados para secciones de tiros con geometría de campo y se discuten las implicaciones del contenido del ruido sísmico para las siguientes etapas de procesamiento e interpretación y sus posibilidades de éxito en la caracterización dinámica de zonas de producción de campos maduros.

1. Introducción.

La tecnología sísmica 4D, también conocida como monitoreo sísmico de tiempo-lapso, proporciona información crucial para evaluar la dinámica de los yacimientos y optimizar la producción de hidrocarburos. La adquisición sísmica de tres componentes (3C) es particularmente valiosa para el monitoreo 4D, ya que captura el campo de ondas completo al registrar el movimiento del suelo en tres direcciones ortogonales: una vertical y dos horizontales. Esto permite la detección de ondas-compresionales (P) y -de corte (S), proporcionando una visión más completa de los cambios en el subsuelo a lo largo del tiempo. Al incorporar ondas-S, que son sensibles a propiedades de las rocas diferentes a las de las ondas-P, la adquisición 3C mejora la capacidad de detectar cambios sutiles en el yacimiento, como movimientos de fluidos, variaciones de presión y

cambios estructurales. Además, mejora la discriminación del ruido y reduce el riesgo de interpretar artefactos, lo que permite evaluaciones más precisas de la dinámica del yacimiento y una optimización en la producción de hidrocarburos.

Sin embargo, la adquisición de estudios multicomponente ha estado limitada en el pasado debido al alto costo del equipo y las ineficiencias operativas, especialmente en terrenos difíciles. Esto ha obstaculizado la disponibilidad de datos 3C adecuados para el monitoreo 4D, a pesar de que los estudios han demostrado que un aumento en la densidad de trazas mejora significativamente la calidad de la señal 4D, al reducir el ruido y minimizar el riesgo de interpretar artefactos (Davies et al., 2021).

En este estudio, se utilizó una metodología innovadora basada en acelerómetros piezoeléctricos de una sola componente (1C) con un amplio rango dinámico y respuesta plana en un rango de 1 Hz a 125 Hz, con batería y almacenamiento de información suficiente para almacenar 28 días continuos de grabación que permiten reducir costos, minimizar el impacto ambiental y mejorar la calidad de los datos adquiridos, los cuales fueron plantados dos veces en diferentes lapsos de tiempo para simular una adquisición 4D-3C. Esta nueva tecnología de adquisición sísmica permite la grabación de las ondas de cizalla generadas a partir de la interacción de la onda-P en el subsuelo produciendo una fase sísmica P-SV a la que comúnmente se le llama “onda-convertida”. En este tipo de adquisiciones se emplean geófonos de tres componentes (3C), es decir, un geófono que contenga un sensor que detecte los desplazamientos verticales y dos sensores (perpendiculares entre sí) que detecten los desplazamientos horizontales.

En el modelo de adquisición inicial se emplearon 3,540 nodos equivalente a 1,180 estaciones receptoras con 3 acelerómetros que fueron acoplados en una estructura para simular geófonos 3C. Cada uno de estos arreglos fue posicionado en cada estaca del diseño de adquisición orientando un geófono en particular hacia el norte, con el fin de que en el procesamiento se haga la transformación de coordenadas para obtener la



componente radial y transversal de la onda-convertida. La estructura 3C de los acelerómetros empleados y el plantado de estos en dos lapsos de tiempo diferentes, dieron como resultado la grabación de tiros con geometría (*shot-gathers*) de tres componentes, útiles para analizar el comportamiento elástico y dinámico del subsuelo en un campo de producción al sur de México.

2. Desarrollo de la Metodología.

2.1 Diseño de Adquisición Inicial.

En el presente trabajo se desarrolló un diseño de adquisición planeado, el cual se muestra en la Fig. 1 (der.). Este diseño se adecuó a diversos factores para cumplir técnica- y presupuestalmente con las condiciones del proyecto del IMP. Se planteó que el espaciamiento entre fuentes fuera de 100m y entre líneas fuente 400m. Por otro lado, la distancia entre estación receptora de 75 y 200 m, así como el intervalo entre líneas receptoras de 200 y 400m. Dicha geometría se planeó con el objetivo de obtener *offset* máximo de 7,000m en superficie (3,500m aproximadamente en profundidad). Así como un BIN de 12.5m x 25m. De manera gráfica, el diseño planeado y su localización se muestran en la Fig. 1, donde los puntos fuente son de color rojo y los puntos receptores son de color azul.

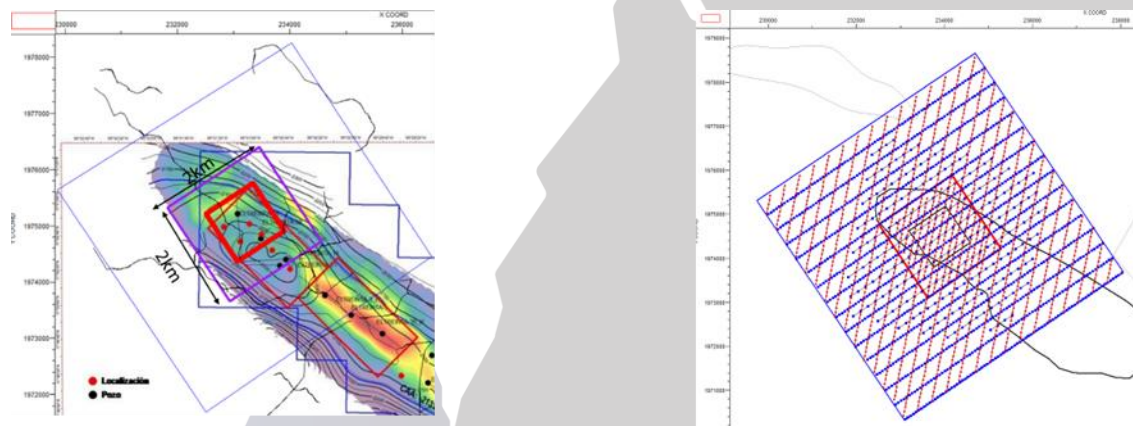


Figura 1. Ubicación del estudio (izq.). Geometría propuesta para fuentes y receptores (der.)

Con esta primera propuesta de diseño, el apilamiento nominal (*full-fold*) fue de 101 trazas por BIN. Se puede observar un comportamiento homogéneo de apilamiento decreciendo hacia los extremos del cubo sísmico (Fig. 2 (izq.)). Otro factor importante es el *offset*. En la Fig. 2 (der.) se muestra el resultado a nivel BIN, donde se puede observar que los histogramas de barras son más homogéneos y consistentes al centro lo que nos indica que el *offset* óptimo está casi en el punto medio del *offset* máximo.

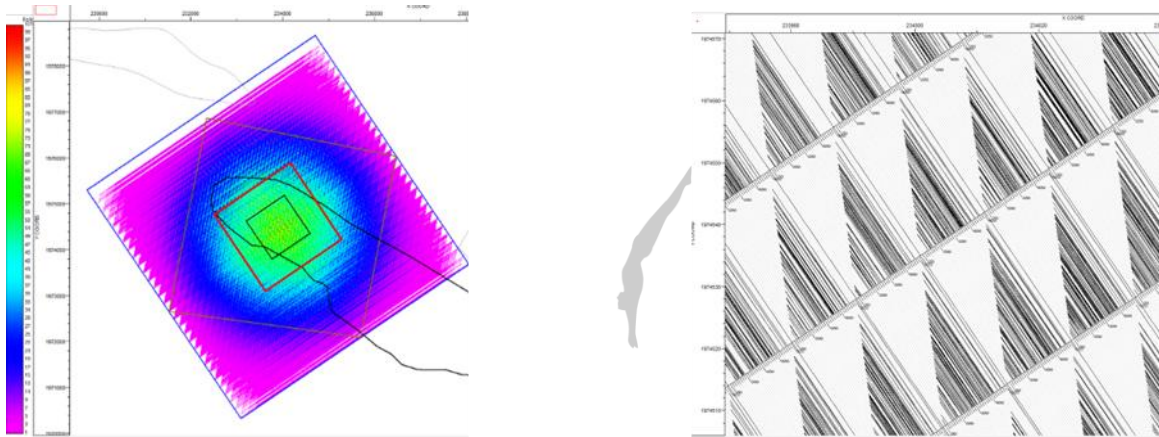


Figura 2. Cálculo de apilamiento, *full-fold* (izq.). Cálculo de histograma de *offsets* a nivel BIN (der.).

Un cálculo estadístico global se realiza mediante graficas de barras (con información de cada BIN), donde se puede visualizar la tendencia de cantidad de trazas y *offsets*. En la gráfica de la Fig. 3 se observa que el *offset* óptimo (de acuerdo con la geometría) está entre los 2,400 y 3,000m.

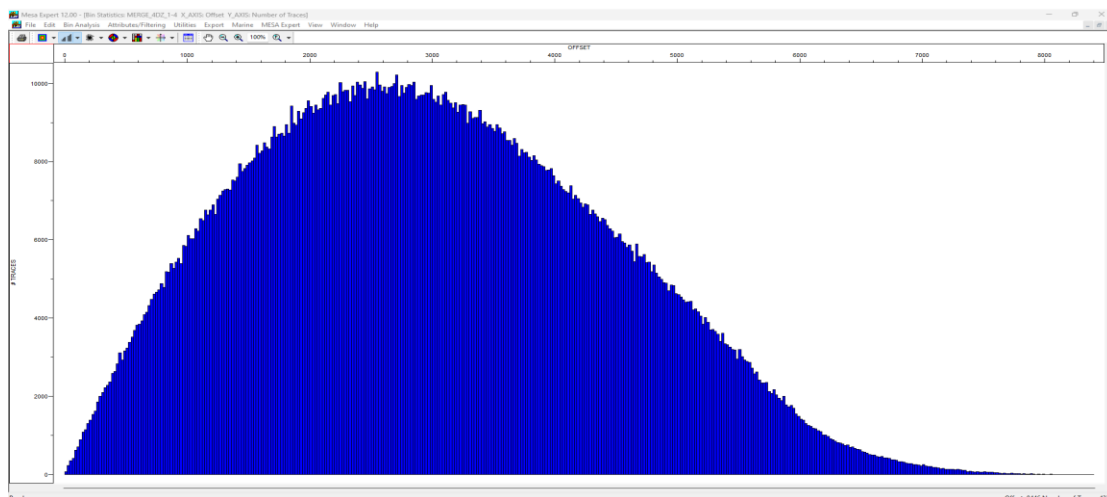


Figura 3. Cálculo de histograma *Offset* y cantidad de trazas en toda el área de estudio.

Otro cálculo estadístico es la relación entre sectores azimutales – *offsets* – cantidad de trazas (Fig.4). Este análisis se denomina “*Diagrama de Rosa*” donde se puede visualizar un comportamiento de la cantidad de trazas constante hasta los 3,000m (cada nivel de *offset* a 500m y cada Angulo a 10°) cumpliendo así con la distribución homogénea azimutal y de *offsets* planteada.

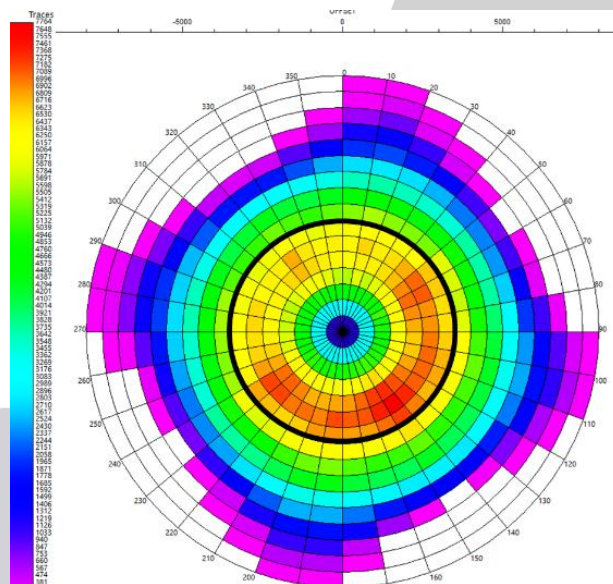


Figura 4. Diagrama de rosa para el diseño de adquisición original.

2.2 Modelado de trazado de rayos.

El trazado de rayos está enfocado a la estructura de interés, misma que se mostró en la Fig. 1 (izq.). En la Fig. 5 se muestra la estructura utilizada en el modelo para el cálculo del trazado de rayos (la escala vertical esta exagerada, con la intención de que se visualice la morfología de la estructura).

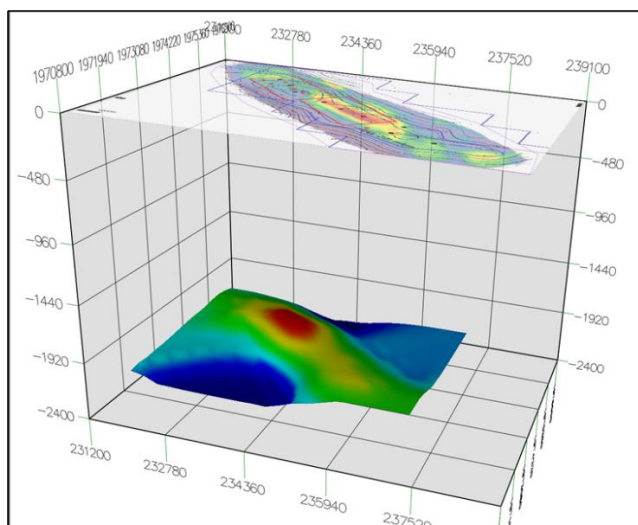


Figura 5. Visualización en 3D de la estructura de interés; imagen georeferenciada.

El modelo para la generación del trazado de rayos consiste en crear una representación simplificada de las estructuras del subsuelo que se encuentra debajo del diseño sísmico. El modelo consta de planos de control verticales y perpendiculares a la superficie, sobre los cuales se define la capa de reflejo que, para este trabajo, es la estructura mostrada en la Fig. 5. Se definen parámetros elásticos homogéneos por arriba y por debajo de la estructura. En la Fig. 6 se muestran los parámetros utilizados para la generación del modelo, además de las velocidades de la onda-P asignadas sobre y debajo de la estructura de interés.

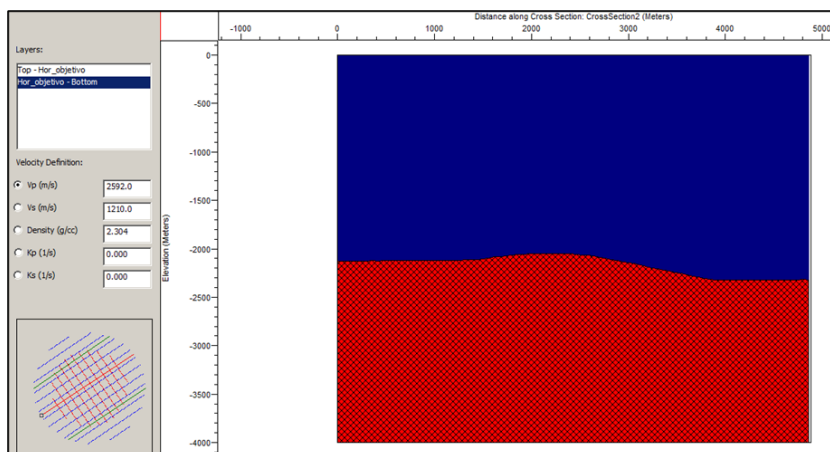


Figura 6. Sección del modelo para el trazado de rayos, asignación de propiedades elásticas.

Los parámetros elásticos se definieron con base en información de pozos. Para el caso de la velocidad de la onda-P se definió una velocidad de 2,592 m/s por debajo de la estructura y una velocidad de 2,200 m/s por arriba de ésta. Una vez elaborado el modelo y en conjunto con el diseño sísmico, es posible realizar el cálculo del trazado de rayos. El proceso es relativamente sencillo debido a que debemos de considerar tres factores importantes y definitivos para este cálculo. Estos son:

1. *El modelo esta simplificado a dos capas, una sobre la estructura y otra debajo de la misma.*
2. *Las dos capas se consideran homogéneas e isotrópicas.*
3. *Se considera las velocidades de cada una para el cálculo de la onda-convertida.*

Con las consideraciones mencionadas es prudente apuntar que el cálculo de trazado de rayos para el caso del diseño tiene como fin principal muestrear adecuadamente la estructura de interés. No obstante, existen limitantes para el cálculo, como por ejemplo, el tiempo. Esto quiere decir que, si se necesita realizar un modelo con más capas, el tiempo de ejecución sería mucho más largo. Por lo anterior, la capacidad

de cómputo juega un rol importante. Se requiere una computadora con las capacidades necesarias para que el proceso no se interrumpa por falta de memoria o el procesador sea muy lento o no pueda soportar más de un proceso de alta capacidad.

2.3 Diseño sísmico ajustado.

A partir del diseño original de la Fig. 1, el equipo de trabajo se dio a la tarea de proponer un nuevo diseño sísmico que cumpliera con las principales condicionantes del proyecto (p. ej., la iluminación y cubrimiento azimuthal, accesos para los puntos fuente y receptores, factores sociales, ambientales y de presupuesto) generando la siguiente información del *pre-plot* del estudio: Intervalo entre fuentes = 50m; Intervalo entre líneas fuentes = 350m; Total de puntos fuente = 524; Intervalo entre receptoras = 50m; Intervalo entre líneas receptoras = 400m; Total de receptoras = 1198. Tamaño del Bin = 25 X 25 m; *offset* max. = 4,800m y *offset* min = 25m. La Fig. 7.1 muestra el diagrama *pre-plot* del diseño sísmico ajustado.

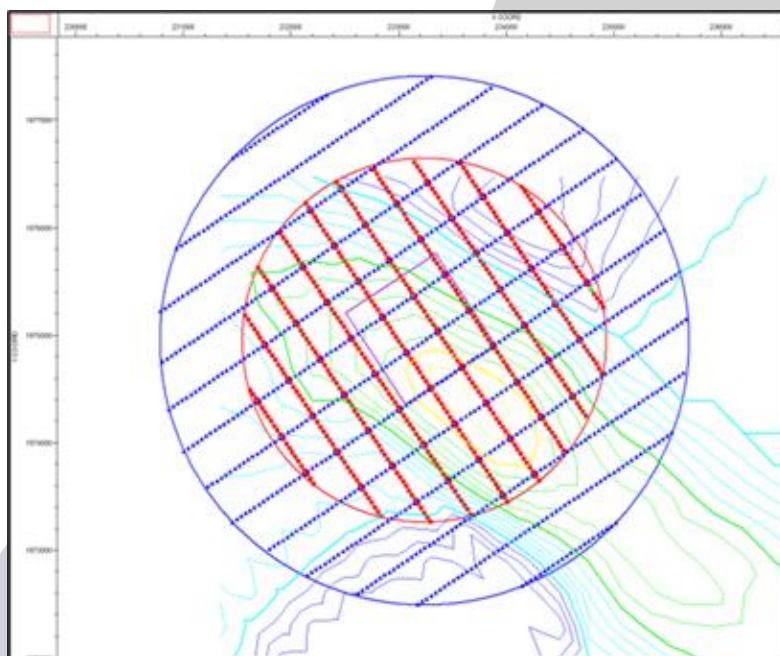


Figura 7.1. Diseño sísmico ajustado *pre-plot*.

Los atributos de cubrimiento o *fold*, distribución del *offset* (específicamente para *offsets* largos) mostrados a continuación toman en cuenta el trazado de rayos empleando el diseño ajustado.

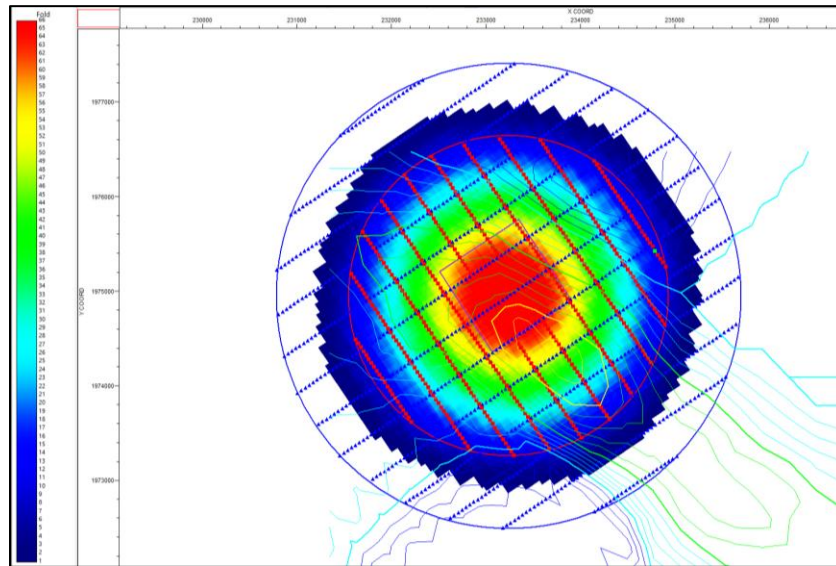


Figura 7.2. *Full-fold* teórico calculado sobre las curvas de nivel correspondiente a la estructura de interés.

En la Fig. 7.2 se presenta la cobertura *full-fold* de la onda-P calculada de forma teórica con respecto a la geometría *pre-plot*. En la Fig. 8, se presenta la cobertura *full-fold* de la onda-P y la onda-convertida calculadas por medio del trazado de rayos. El *full-fold* de la Fig.7.2 generada de forma teórica, permite contrastar con los cubrimientos mostrados en la Fig.8 generados por medio del cálculo de trazado de rayos. Las coberturas de la Fig. 8 son generadas exactamente sobre la estructura visualizada de planta. Para este caso el valor del *fold* es correspondiente a la cobertura que se tiene sobre la superficie de la estructura. Por esta razón se observa deformación sobre los flancos de la estructura. Para el caso del *fold* de la onda-convertida (Fig. 8. (der.)) sobre la estructura se observa una mejor cobertura al centro del diseño en comparación con el de la onda-P (Fig. 8 (izq.)).

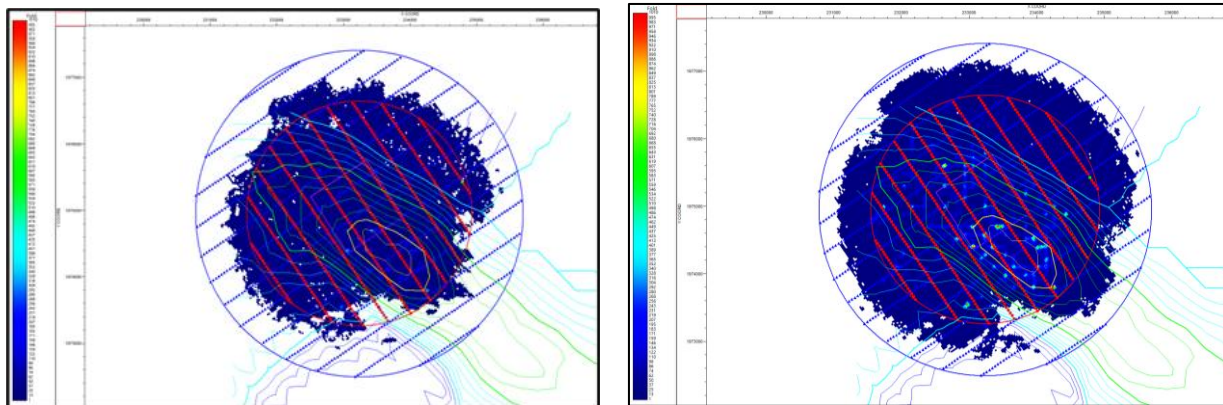


Figura 8. *Fold* calculado por medio del trazado de rayos sobre la forma de la estructura de interés para la onda-P (izq.) y onda-convertida (der.).

Otro atributo importante es la distribución de *offsets*. En la Fig. 9 observamos un gran contraste en la distribución de los *offsets* lejanos para los casos presentados. En la imagen de la distribución de *offsets* de la onda-convertida (Fig. 9 (der.)) la distribución de dichos *offsets* se concentran mayormente sobre los flancos de la estructura. Por el contrario, la distribución de *offsets* para la onda-P, se concentran al centro de la estructura. Este efecto lo podremos observar desde otro ángulo (3D) en las imágenes del trazado de rayos (Fig. 10).

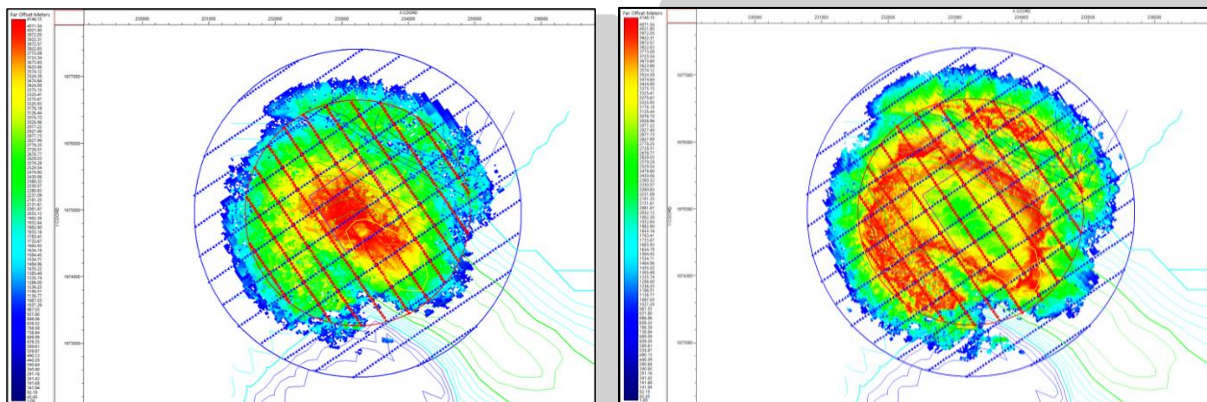


Figura 9. Diagrama de *offsets* lejanos, calculado por trazado de rayos sobre la estructura de interés para la onda-P (izq.) y para la onda-convertida (der.).

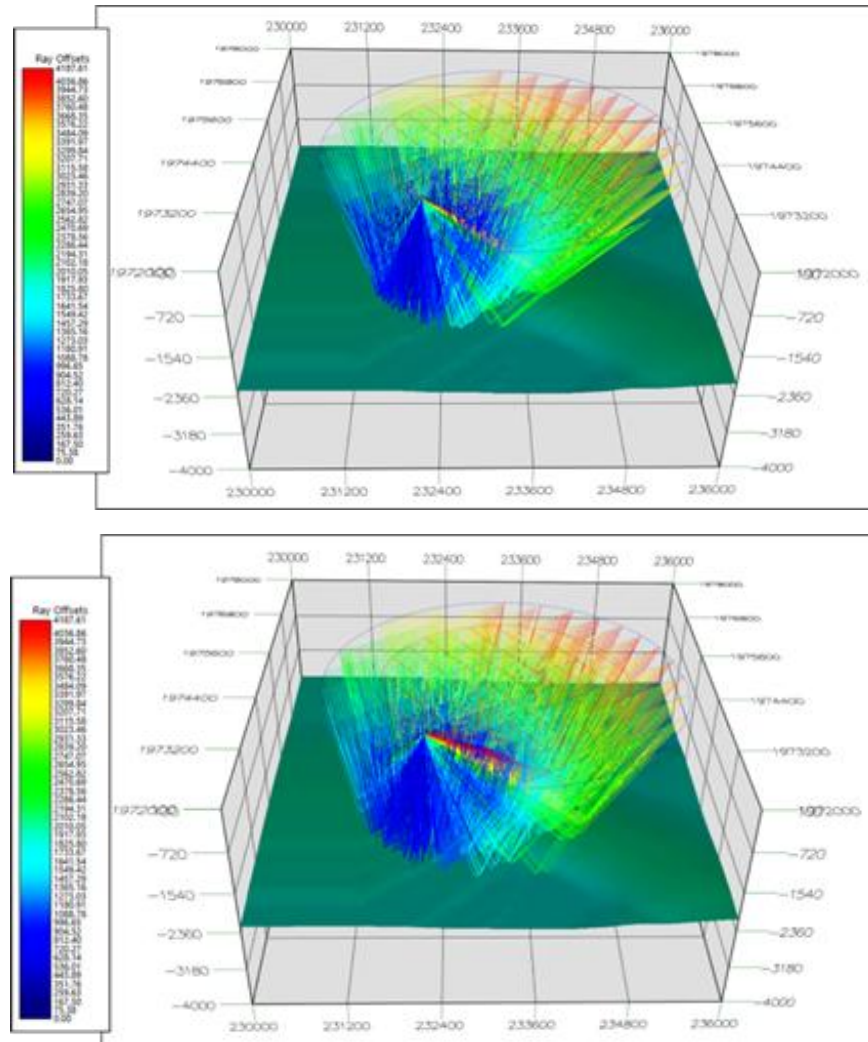


Figura 10. Cálculo del trazado de rayos para la onda-P (arriba) y para la onda-convertida (abajo).

En la Fig. 10 se muestra el cálculo del trazado de rayos de onda-convertida (abajo) y de onda-P (arriba). Los colores de los rayos corresponden al *offset*. Es claro que los rayos más lejanos conciernen a los calculados con la onda-convertida. Por ejemplo, la comparación de las imágenes de la onda-convertida y -P, los rayos que salen de la fuente pasan la estructura para el caso de la onda-convertida, mientras que para el caso de la onda-P, no logran cruzar la estructura de interés. Por esta razón los rayos calculados para la onda-S son los que generan mayores *offsets*. Esto es consistente con las imágenes de distribución de *offsets* de la Fig. 9.

Las condiciones del terreno, cuestiones sociales y ecológicas definen en gran medida la ubicación de fuentes y receptoras, siendo las fuentes las que mayor afectación tienen en su posicionamiento en campo. Para este caso en el cual se utilizó como fuente de energía *mini-vibros*, el *post-plot* teórico resultó como se muestra en la Fig. 11 (izq.). Aquí se muestran los puntos fuente en cuadros color rojo y las estaciones receptoras en triángulos color azul. El *post-plot* del estudio se muestra sobre una imagen satelital del terreno el cual nos permite identificar zonas de alta densidad de vegetación y alturas topográficas calculadas por el método LIDAR. Se observa una superficie muy irregular, dando como resultado un considerable desplazamiento de fuentes con respecto al diseño *pre-plot* de la Fig. 7.1.

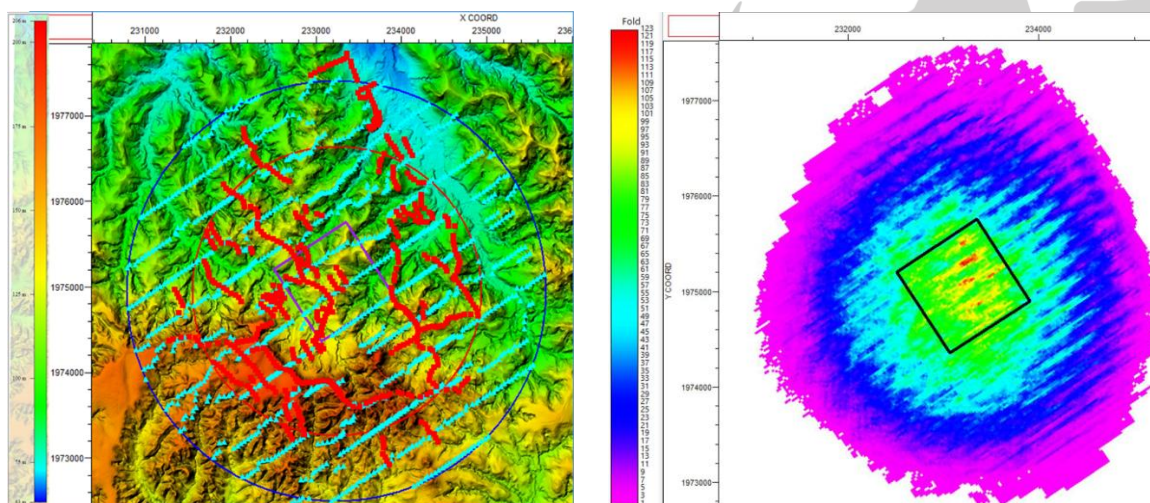


Figura 11. Despliegue de fuentes y receptoras (*post-plot*) sobre el mapa de elevaciones, escurrimientos y zonas bajas en la zona de estudio (izq.). Diagrama de cubrimiento *full-fold*, para el *post-plot* de la adquisición (der.).

En la Fig. 12 se presentan resultados para el trazado de rayos con respecto al *post-plot* del estudio. El modelo utilizado es el mismo que se utilizó y explicó en la Fig. 6. Se realizaron cálculos de trazado de rayos de la onda-P (Fig. 12 (arriba)) y su correspondiente cálculo para la onda-convertida (Fig. 12 (abajo)). Como se puede observar se utilizaron fuentes ubicadas preferentemente a los flancos de la estructura.

De esta forma podremos apreciar los efectos de los rayos que pueden cubrir y cruzar la estructura dependiendo de su profundidad.

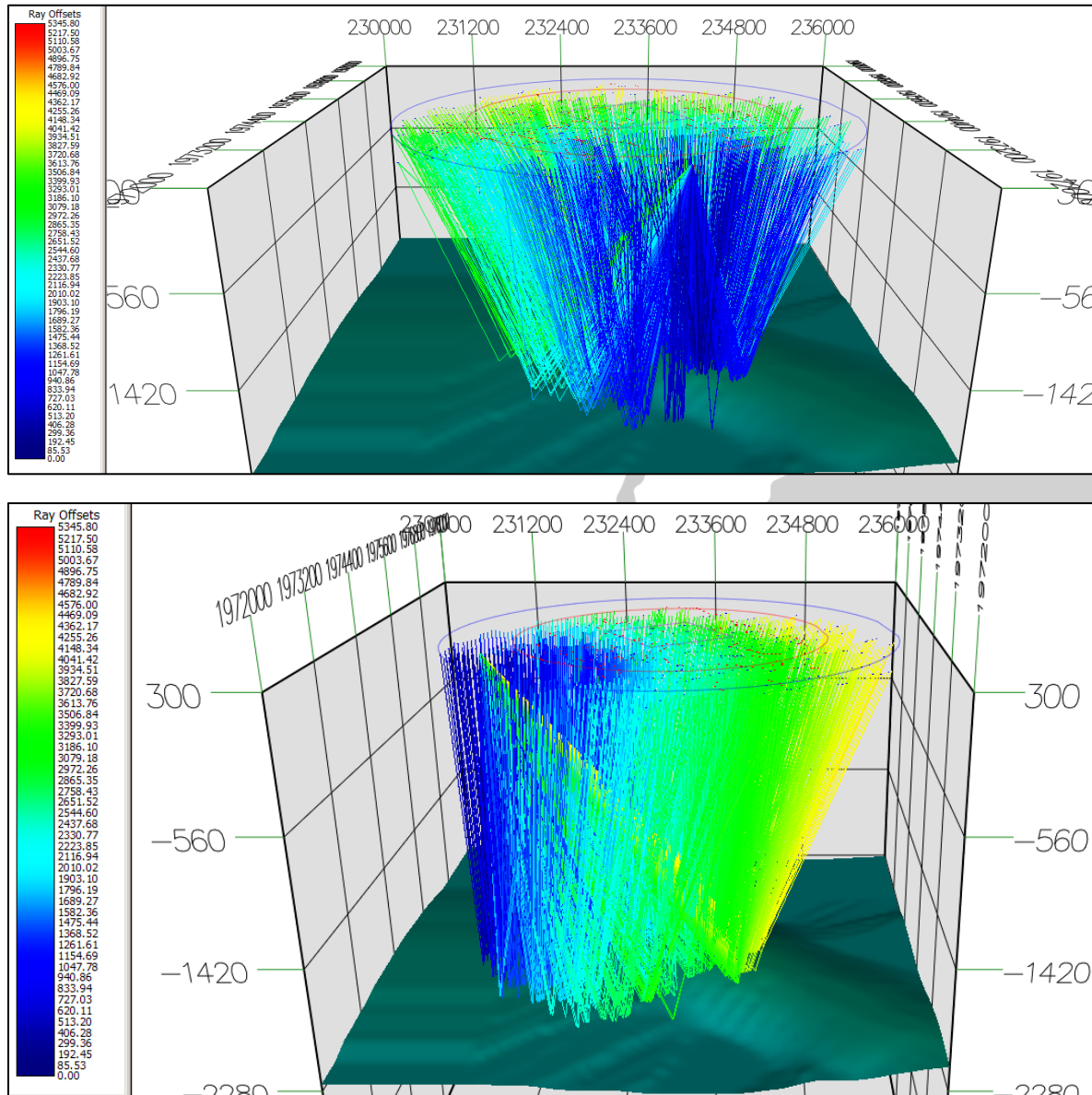


Figura 12. Trazado de rayos para la onda-P (arriba) y onda-convertida (abajo) con dos fuentes hacia los flancos, levantamiento con todas las receptoras activas (*full spread*).

Del ejercicio de trazado de rayos para ambos casos del cálculo *pre-plot* (Fig. 7.1) como *post-plot* (Fig. 11 (der.)) se resume que la estructura se ilumina

adecuadamente. La onda-convertida aporta más cobertura en los flancos de la estructura, mientras que la onda-P concentra sus trayectorias al centro del diseño, mismo que coincide con la parte más superficial de la zona de interés. A pesar de realizar una gran cantidad de desplazamientos en el *post-plot* real del estudio (Fig. 11), se conserva la cobertura de la estructura y su iluminación, con un comportamiento similar al diseño *pre-plot*.

2.4 Sistema de adquisición y equipo STRYDE.

El *STRYDE Node* se muestra en la Fig. 13. Éste es un sensor sísmico nodal autónomo, compacto y resistente, basado en un acelerómetro piezoeléctrico de un solo componente. Ofrece un amplio rango dinámico y una respuesta instrumental plana en todo el ancho de banda de frecuencias. El nodo está diseñado como una unidad sellada, sin puntos de conexión eléctrica externos. Se comunica con otros componentes del Sistema Nimble de STRYDE a través de un enlace de datos óptico y se carga de forma inalámbrica cuando se coloca en la unidad de carga y extracción de datos.

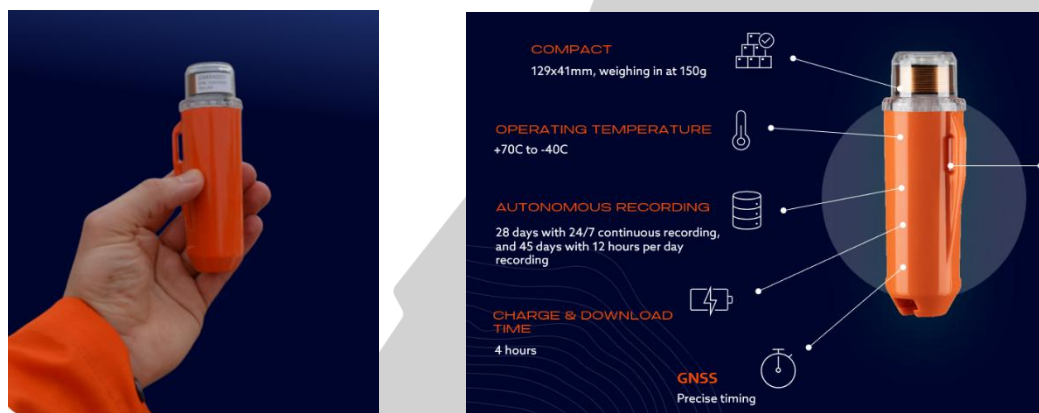


Figura 13. Nodo STRYDE

Cada nodo cuenta con suficiente batería y capacidad de almacenamiento de datos para permitir un registro autónomo continuo de hasta 28 días. Este período puede extenderse configurando el nodo para utilizar un programa de grabación diaria. Los

nodos STRYDE utilizados en este trabajo, son nodos autónomos de un solo componente (Ourabah et al., 2021). Cada nodo pesa 150 gramos y tiene una dimensión cilíndrica de 13x4 cm (Fig. 13), lo que los hace fáciles de transportar y desplegar en terrenos de difícil acceso. Cada nodo está equipado con un sistema GNSS para sincronización y posicionamiento, y cuenta con un empaque sellado a prueba de agua sin puntos de conexión, lo que le permite resistir condiciones climáticas adversas. El sensor dentro del nodo es un acelerómetro piezoeléctrico con una respuesta plana entre 1 Hz y 125 Hz. (Fig. 14).

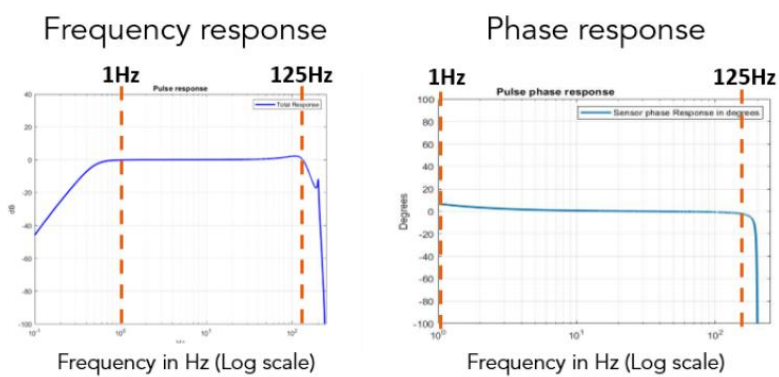


Figura 14. Respuesta de amplitud y fase en el dominio de la frecuencia para los nodos STRYDE utilizados.

Los nodos también pueden registrar ondas de corte si se instalan horizontalmente (Ourabah et al., 2021). Aprovechando esta capacidad, en este levantamiento combinamos tres nodos por estación para formar 1,200 estaciones de tres componentes a partir del inventario disponible de 3,600 nodos de un solo sensor. Aunque el despliegue de sensores 3C desacoplados lleva un poco más de tiempo que los nodos 3C integrados convencionales, ofrecen ventajas significativas, incluyendo costos más bajos, versatilidad del inventario (3,600 nodos pueden utilizarse como 1C, o convertirse en 2,600 nodos 2C, o 1,200 nodos 3C según sea necesario) y una huella individual más pequeña en comparación con los nodos 3C más voluminosos.

Esta configuración flexible permitió una adaptación eficiente a las complejidades del terreno y optimizó la cobertura sísmica en toda el área de nuestro estudio.



Figura 15. De izquierda a derecha: el nodo autónomo de sensor único de Stryde, el arreglo 3C, el sistema de carga y extracción de datos Nimble.

2.5 Adquisición de datos sísmicos y fases operativas.

La adquisición de datos sísmicos de reflexión de alta densidad se ejecutó en un área al sureste del estado de Veracruz. Las fases operativas desarrolladas en campo fueron: Gestoría; Medición topográfica de fuentes y receptoras; Prueba de campo; Plantado de nodos; Grabación de datos sísmicos; Levantado de nodos y Descarga-armado de *shot-gathers*. En el presente trabajo se mencionan los aspectos técnicos-operativos desarrollados en campo durante la adquisición.

A. GESTORÍA.

La fase de gestoría está formada por actividades internas las cuales son: solicitud de permisos, delimitación de predios, apoyo a las fases operativas mediante la atención a propietarios y el pago de finiquitos. La atención a propietarios se establece desde el inicio de la solicitud de permisos hasta el pago de finiquitos. Durante el proyecto, la fase de gestoría estuvo dedicada al apoyo para las otras fases operativas al tener comunicación directa con los propietarios para avisar sobre las actividades diarias de grabación y movimientos de los vibro-sismos.

B. MEDICIÓN DE RECEPTORAS.

De manera general, la medición de receptoras consiste en grabar coordenadas X, Y así como elevaciones con equipos especializados cuya exactitud es de $\pm 5\text{cm}$. Utilizan satélites para su georeferencia. El primer paso en la medición es posicionar bases de control que sirven para controlar la referencia geodésica para cada estación receptora medida. En la Fig. 16 se muestran evidencias fotográficas de la supervisión del IMP durante la medición de receptoras.



Fig. 16. Posicionamiento de punto base receptor.

C. MEDICIÓN DE FUENTES.

Antes de iniciar la medición en campo, la operadora realizó un modelado de fuentes para programar sus grupos de trabajo. Este modelado de campo se validó por parte de la supervisión del IMP en turno. Los desplazamientos realizados fueron en su mayoría en dirección *in-line*. Sin embargo, por cuestiones de la morfología presente en la zona fue necesario realizar desplazamientos *cross-line* o *in-fill*, lo anterior considerando que la fuente de energía empleada fue el vibro-sismo. En la Fig. 17 se muestra evidencia de la supervisión del IMP durante la medición de fuentes.



Fig. 17. Supervisión en la medición de estación fuente en potrero.

D. GRABACIÓN DE DATOS SÍSMICOS 3D-3C (FUENTE DE ENERGÍA VIBROSISMOS).

Se plantaron 3,540 nodos equivalente a 1,180 estaciones receptoras. El programa medido fue de 1,198 receptoras. El faltante de nodos plantados se debe a predios en los cuales no se otorgaron los permisos de paso. Para iniciar la grabación se deben tener establecidos y

acordados los parámetros técnicos del proyecto. A continuación, se muestra la Tabla 1 con los parámetros de la dos adquisiciones.

Parámetros de Diseño	
Tecnología de grabación	sistema nodal autonomo
Tamaño del BIN	25m x 25m
Apilamiento nominal Full fold	109 trazas por Bin
Offset máximo	4,800m
Offset mínimo	25m
Técnica FAZ	hasta 4,000m
Parámetros de fuente	
Intervalo entre puntos fuente	50m
Intervalo entre líneas fuente	350m
Puntos fuente por km ²	131 fuentes/km ²
Puntos fuente por salvo	2 a 8
Acimut de líneas fuente con respecto al norte	325.14°
Volumen de obra preplot 4D-3C por set de datos	524 fuentes
Área de fuentes para Estudio 4D-3C (superficie operativa en campo de cada bloque)	4km ²
Parámetros de receptoras	
Intervalo entre receptoras	50m
Intervalo entre líneas receptoras	400m
Cantidad de sensor de grabación por estacion medida	1 nodo vertical, 1 nodo H1, 1 nodo H2
Puntos receptores por km ²	63 rec/km ²
Acimut de líneas receptoras con respecto al norte	55.69°
Volumen de obra preplot útil 4D-3C por bloque	1,198 receptoras
Área de receptoras útil para Estudio 4D-3C (superficie operativa útil de cada bloque)	19 km ²
Parámetros de grabación	
Fuente principal de energía	2 Vibrosismo por punto
Líneas receptoras activas por punto fuente	22 líneas receptoras activas
Total de nodos activos por punto fuente	1,198 nodos verticales
	1,198 nodos H1
	1,198 nodos H2
Tiempo de grabación	8 seg
Intervalo de muestreo de grabacion	2 ms
Patch de grabación	22 líneas receptoras activas (full template)
Numero de vibradores por set	2
Número de barridos	4 barridos
Longitud de barrido	16 segundos
Frecuencias mínima/máxima de vibración	10-260Hz

Tabla 1. Parámetros utilizados en la ejecución del estudio sísmico.

El área donde se localiza el proyecto es una zona en la cual no existe una gran cantidad de terracerías o caminos, la morfología presente es medianamente abrupta y con abundante vegetación. Estos factores son condicionantes importantes que complican la operación mediante el uso de camiones vibradores (vibro-sismos). De tal manera que la grabación se realizó llevando a cabo una logística operativa secuencial, en donde el personal de campo de la operadora se dedicó a planear diariamente cual estrategia operativa era la adecuada para lograr que los vibro-sismos tuvieran acceso a los puntos medidos. Estas operaciones implicaron bajar cercos, cubrir pasos a desnivel y guiar a los operadores de vibro-sismos hasta los puntos medidos. La Fig. 18 muestra un ejemplo de las maniobras de los camiones vibradores para ubicarse en las coordenadas de los puntos fuentes.



Fig. 18. Supervisión de maniobras para la grabación de datos sísmicos.

Una vez que los “guías de vibros” ubican el punto fuente, le notifican a los operadores del vibro-sismo para que se posicionen y empiecen a vibrar. En otras palabras, grabar las ondas sísmicas.

E. LEVANTAMIENTO DE NODOS.

Una vez que se finalizó la grabación de datos sísmicos, se dio inicio al levantamiento de los nodos utilizados. El levantamiento de nodos consistió en recorrer todas las líneas receptoras del estudio, ubicar cada estación receptora mediante GPS (donde estuvieron plantados los nodos), apagar cada nodo mediante el dispositivo iniciador y trasladarlos hacia la oficina técnica de la brigada para su limpieza y posterior descarga en el sistema STRYDE.

F. ASPECTOS DE SALUD, SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE.

La operadora SeisGlobe Geoservices S.A. de C.V. desarrolló las actividades en campo considerando todas las medidas de seguridad de acuerdo con las normativas mundiales y nacionales. Bajo la premisa de “**La seguridad es primero**” la operadora llevó a cabo diversos controles diarios, los cuales fueron validados por los supervisores del IMP en turno.

3. Resultados y discusión.

Se realizaron dos campañas de adquisición de datos sísmicos utilizando 1200 nodos STRYDE distribuidos en el área de estudio con un espaciamiento de 50 metros. Las fuentes de energía se colocaron a la misma distancia, empleando vibro-sismos en lugar de cargas sísmicas, lo cual redujo el impacto ambiental. Durante la adquisición de datos sísmicos es fundamental el respeto a los usos y costumbres sociales. Considerando lo anterior se determinó que la fuente de energía a emplear fuera el vibrosismo. Si bien la morfología del área representó un reto, la adquisición de datos sísmicos se realizó logrando posicionar la mayor cantidad de fuentes y receptores. Las mediciones permitieron alcanzar un apilamiento máximo *full-fold*.

Por otro lado, las operaciones en campo se desarrollaron sin la necesidad de abrir brechas o talar vegetación, siempre respetando el ecosistema, el entorno y la tranquilidad social, bajo las medidas de seguridad, salud y medio ambiente implementadas por la operadora y supervisadas por el Instituto Mexicano del Petróleo. Las adquisiciones de datos se realizaron logrando resultados positivos, registrando el mayor número de las trazas planeadas, incluyendo las tres componentes. La calidad de los datos, esto es la relación señal/ruido es aceptable (Solano-Bahena, et. al. 2023), tomando en consideración que la zona del estudio corresponde a un activo de producción en dónde se realizan continuamente actividades industriales. La Fig. 19 muestra una serie de trazas en el domino de la fuente (*shot-gathers*) como resultado de los productos entregables de nuestro proyecto.

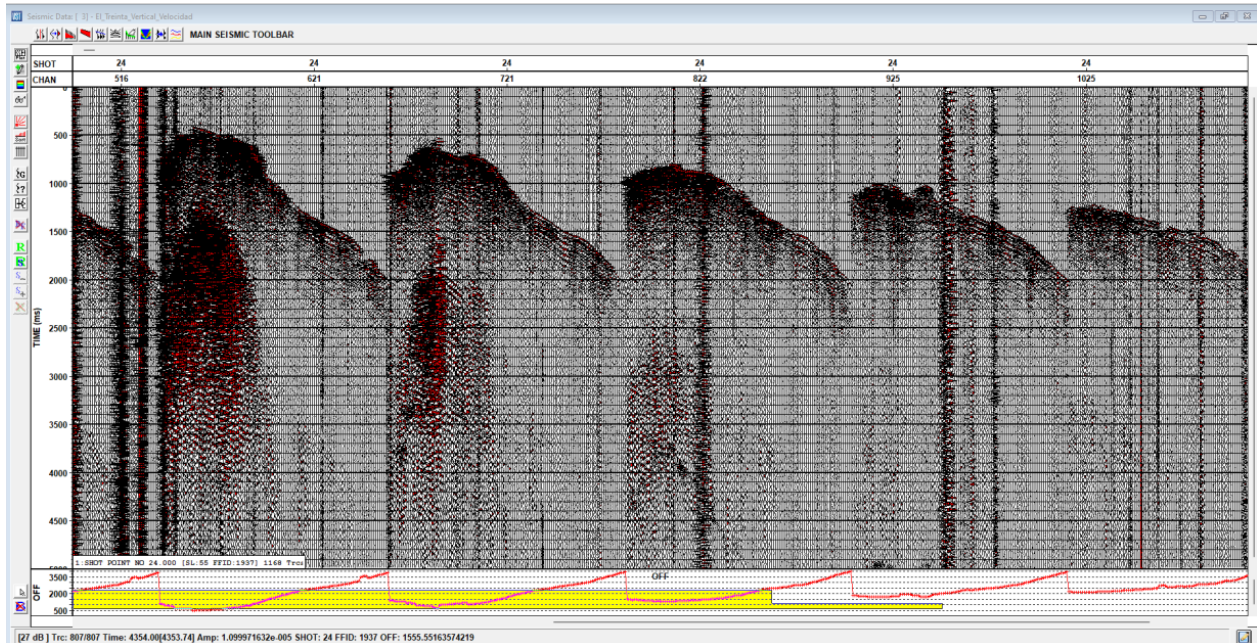


Figura 19. Shot-gather, componente vertical. Los datos sísmicos desplegados son velocidades.

Como se puede apreciar, las trazas generadas representan un reto nuevo para la preparación y el procesamiento de datos. Los altos contenidos de ruido sísmico, la fuente alterna utilizada (vibro-sismo) y los desplazamientos, tanto de fuentes como de receptoras, implicarán nuevos pasos en los flujos de procesamiento con la finalidad de mejorar la relación señal/ruido y lograr la obtención de imágenes sísmicas de buena utilidad para las interpretaciones.

4. Conclusiones

Se presentaron resultados del modelado, diseño y adquisición de datos sísmicos 4D-3C- de alta resolución (HR) utilizando sismómetros de última generación en un campo de producción de la Cuenca Petrolera de Veracruz México. Nuestro estudio sismológico corresponde a una metodología innovadora desarrollada por el IMP, la cual se basó en el empleo de 3,540 nodos equivalente a 1,180 estaciones receptoras con 3 acelerómetros que fueron acoplados en una estructura ortogonal para simular geófonos 3C. Cada uno de estos arreglos fue posicionado en cada estaca del diseño de

adquisición, orientando un geófono en particular hacia el norte, con el fin de que en el procesamiento se haga la transformación de coordenadas para obtener la componente radial y transversal de la onda-convertida. La estructura 3C de los acelerómetros empleados y el plantado de estos, en dos lapsos de tiempo diferentes (4D), dieron como resultado la grabación del comportamiento elástico y dinámico del subsuelo. Se obtuvieron cálculos estadísticos *pre-plot* y *post-plot* del diseño de adquisición y del modelado con trazado de rayos. Se describió un panorama general de los aspectos operativos durante la adquisición de datos sísmicos 4D-3C-HR en campo. Se realizó la discusión de los resultados para secciones de tiros con geometría y de sus implicaciones sobre el contenido del ruido sísmico para las siguientes etapas de procesamiento e interpretación y sus posibilidades de éxito en la caracterización dinámica de zonas de producción de campos maduros.

Por su parte, el uso de los sensores STRYDE en el proyecto demostró ser un avance significativo en la adquisición sísmica de alta resolución. Estos sensores, con su diseño compacto y su capacidad de operación autónoma continua de hasta 28 días, permitieron reducir notablemente la logística y los costos operativos. Su respuesta plana en un amplio rango de frecuencias (1 Hz a 125 Hz) garantizó la obtención de datos precisos y de alta calidad, lo cual es fundamental para el procesamiento sísmico 3D y 4D. Además, su implementación en el campo permitió maximizar la cobertura sísmica sin necesidad de talar la vegetación, respetando el entorno natural y las condiciones sociales de la zona. Sin duda, esta tecnología facilitó un despliegue rápido y flexible, adaptándose a las complejidades morfológicas del terreno y optimizando el apilamiento *full-fold* alcanzado. Por otro lado, la capacidad de almacenamiento interno de los nodos STRYDE brindó la ventaja de registrar continuamente sin interrupciones, lo cual mejoró la eficiencia en la recolección de datos durante las dos campañas de adquisición y sus costos. En términos operativos, la combinación de estos sensores con una fuente de energía de vibro-sismo en lugar de cargas sísmicas tradicionales, reforzó el enfoque de bajo impacto ambiental del proyecto. Es decir, los sensores STRYDE no solo

contribuyeron a la obtención de datos de alta calidad, sino que también establecieron un estándar más sostenible y rentable para futuras aplicaciones en proyectos del IMP de monitoreo sísmico en campos petroleros terrestres, especialmente aquellos con condiciones complejas como las presentes en la Cuenca Petrolera de Veracruz.

5. Agradecimientos

Los autores del presente trabajo expresamos nuestro sincero agradecimiento al apoyo de las actividades de campo y los fondos otorgados por el Instituto Mexicano del Petróleo, dentro del proyecto D.72010 (antes D.62029).

6. Referencias

- Davies, D.; Tillotson, P.; Chapelle, M.; Bullock, A.; Aviles, Barnes, J. and D. Evans 2021. Understanding the importance of receiver density on the PP and PS data at Clair. *European Association of Geoscientists & Engineers; 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition*, Vol. 2021, pp.1 – 5, DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202113051>
- Solano-Bahena, R.; Aguirre-González, J.; Ávila-Carrera, R., y Granados-Chavarría, I. 2023. Reconstrucción de Imágenes Sísmicas Virtuales con Técnicas de Interferometría en Datos de Sísmica Pasiva, *Geofísica Internacional*, Vol. 62, Num.1, pp: 403 – 418. <https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2023.62.1.1448>
- Ourabah, A.; Petronio, L.; Affatato, A.; Baradello, L.; Goujon, N. and Z. Song 2021. Using 1C nodes in a 3C combination - benefits, and inconveniences. *European Association of Geoscientists & Engineers, NSG2021 27th European Meeting of*



- *Environmental and Engineering Geophysics*, Aug 2021, Vol. 2021, pp.1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120139>
- Ourabah, A.; Popham, M. and C. Einchcomb. 2021. New node design enabling higher density seismic acquisition could be a game changer. *First Break*, Vol. 39, Issue 6, Jun 2021, pp. 81 – 88. DOI: <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2021046>

