

BENEFICIOS DE INTERPOLACIÓN/REGULARIZACIÓN 5D EN SUB-SUPERFICIE SOBRE INFORMACIÓN SÍSMICA SOMERA

Néstor Herrera¹, Mario Vergara², Emilse Zunino²

1: Wellfield Services L.T.D.A., nestorherrera@wellfield.cl

2: Pluspetrol, mvergara@pluspetrol.net, ezunino@pluspetrol.net

Palabras clave: Interpolación, Sísmica, Somera, Atributos, COV

ABSTRACT

A 5D interpolation algorithm was applied on a seismic cube with shallow geologic objectives and presence of surface basalts in the Neuquén basin.

This process was developed in former times to provide higher data quality for migration algorithms and to cover areas with acquisition gaps.

In addition to the exposed, for this data, the 5d interpolation algorithm compensates the effect of the fold's decrease due to acquisition's design in sections of the cube with less prospective interest.

This paper shows the improvement obtained on the PSTM seismic image and its consequence on the seismic attributes generated after sub-surface interpolation.

INTRODUCTION

El área Puelén está ubicada en el Sur de la provincia de Mendoza, en el margen nororiental de la cuenca Neuquina.

Limita al Este con la provincia de La Pampa (Fig. 1).

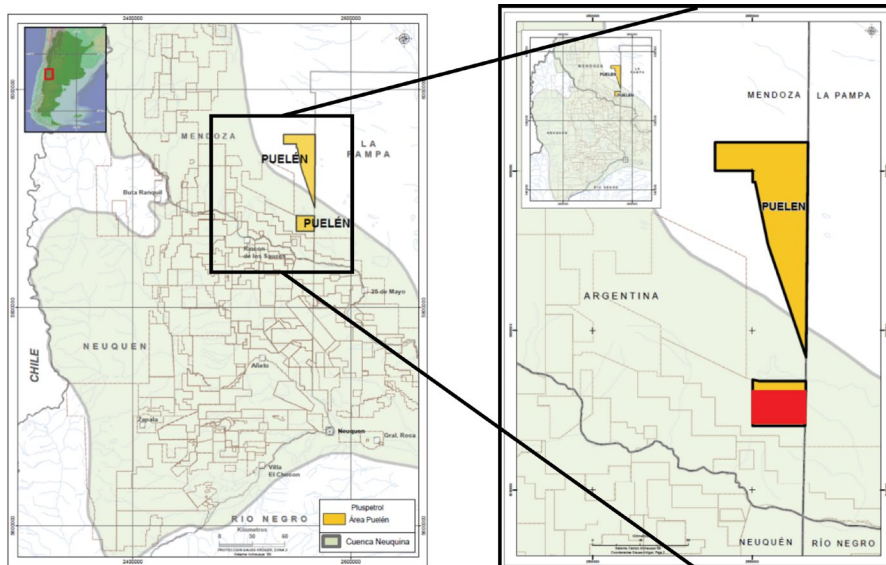


Figura 1. Ubicación del bloque y del cubo sísmico (área resaltada).

En un ámbito geológico de borde de cuenca con presencia de basaltos en superficie y sub-superficie por sectores, el principal objetivo exploratorio son trampas estratigráficas y/o estructurales someras, cuyas profundidades varían entre 400 y 600 metros en el Gr. Neuquén, la Fm. Centenario y el Gr. Precuyo. En la figura 2 se observa un corte esquemático NE-SO donde se muestran los objetivos de interés.

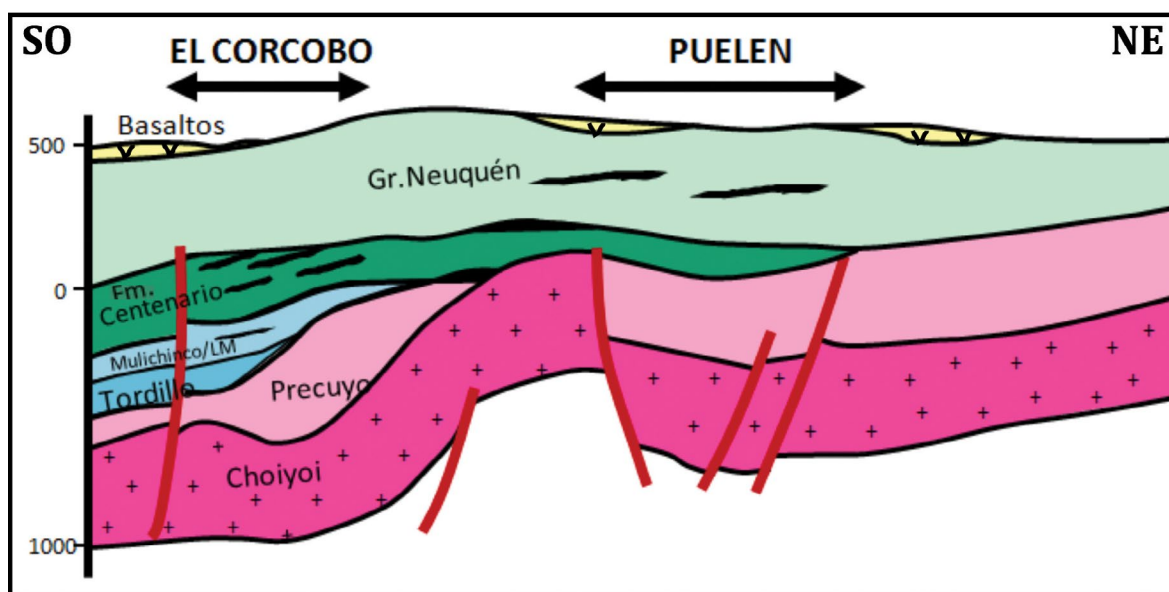


Figura 2. Esquema de objetivos estratigráficos-estructurales. (Informe interno Pluspetrol 2017, Apreda y Battista)

Luego de reprocesar e interpretar información sísmica 2D existente en el área, en el año 2016 se adquieren 200 km² de sísmica 3D con parámetros diseñados para enfocar los objetivos planteados.

El diseño del 3D es “Wide Azimuth” con un total de 31.382 receptores y 27.227 puntos vibrados. La cantidad de trazas pre-stack es de 25.654.333, incrementándose en aproximadamente un 24% luego de la interpolación 5D. La totalidad de trazas post-stack es de 498.607.

El tendido típico de adquisición consta de 16 líneas receptoras de 64 canales cada una, totalizando una cantidad de 1.024 canales por registro.

Las líneas receptoras se ubican en la dirección SO-NE con un espaciamiento 160 metros entre las mismas, siendo la distancia entre estaciones receptoras de 40 metros. Asimismo las líneas de fuentes se alinean en dirección NO-SE con una distancia variable entre líneas de 160 metros en la zona SO y de 320 metros en la zona NE, con un espaciamiento entre puntos vibrados de 40 m. El fold nominal varía entre 64, para la zona con menor distancia entre líneas de emisión, y 32 para la zona donde las líneas están más espaciadas. Este cambio de diseño se debe a que el sector NE presenta un menor interés prospectivo. En la figura 3 puede observarse la distribución de líneas de recepción y fuente además del fold nominal del cubo sísmico. En la figura 4 se muestra un diagrama de rosas con la distribución del dato versus el offset y el azimut.

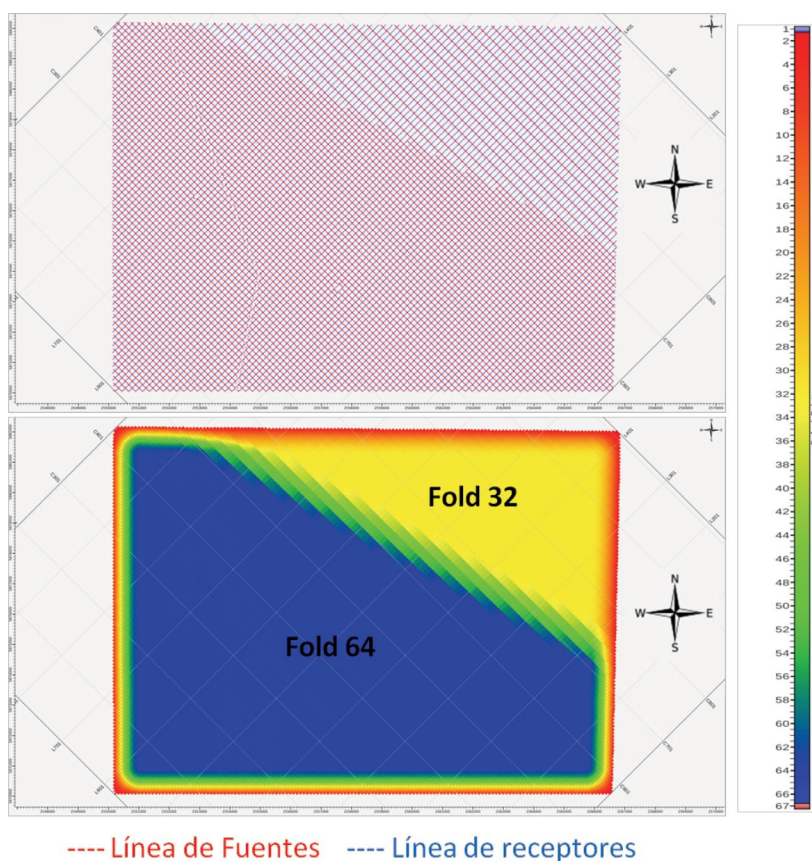


Figura 3. Diseño del 3D: post plot y mapa de fold.

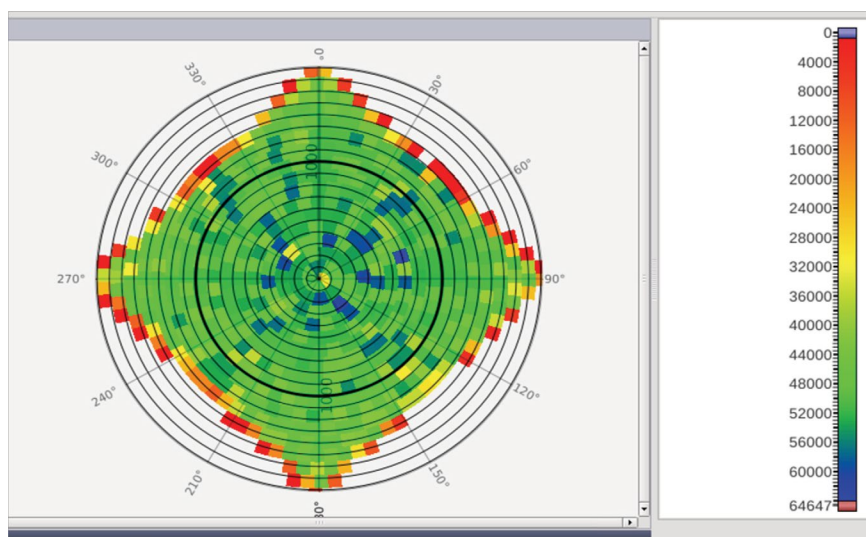


Figura 4. Diagrama de Rosa para el 3D tipo "Wide Azimuth".

La mencionada presencia de basaltos en superficie y sub-superficie impactó negativamente en la imagen sísmica, la cual se vio deteriorada debido a la pérdida de frecuencia y continuidad de los reflectores.

La secuencia de procesamiento implementada generó como producto final una imagen migrada pre-stack en tiempo (PSTM) optimizada, particularmente en la zona de interés. Aplicaciones como la tomografía sísmica de refracción, el picado de velocidades interactivo tanto sobre secciones stack como sobre secciones migradas, y la selección de enmudecimiento frontal de detalle, fueron importantes para mejorar la imagen en el objetivo. No obstante, el punto decisivo en la secuencia de proceso fue sin lugar a dudas la implementación de la regularización / interpolación 5D en el dominio COV.

MARCO TEÓRICO

Objetivo en la búsqueda de un agrupamiento ideal de datos

En el procesamiento de datos sísmicos a menudo es necesario organizar el dato existente de diferentes maneras, cada una de ellas con un fin específico. Por ejemplo, para la atenuación de ruido de fuente es útil organizar el dato en orden shot-receptor, ya que permite discriminar eficientemente la señal del ruido. Para la migración pre-apilado (PSTM), caso de estudio de este trabajo, se debe recurrir a otros agrupamientos que, cumpliendo determinadas condiciones, permitan optimizar la implementación del algoritmo.

La primera condición se refiere a la obtención de volúmenes completos, carentes de huecos. La segunda establece que cada volumen completo en cuestión tenga celdas de fold unitario, de manera de optimizar el uso de los datos.

El agrupamiento tradicional en rangos de offsets (common offset gather o COFF) para adquisiciones 3D estándar no cumple estas condiciones (ver Fig. 5).

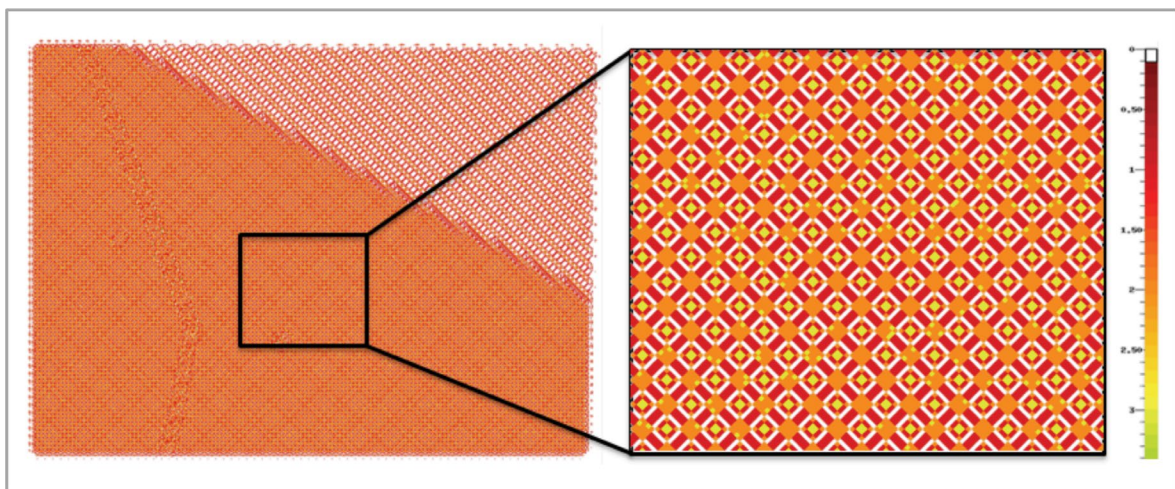


Figura 5. Mapa de fold para un rango medio de offset en una adquisición 3D. Los puntos en amarillo indican fold 3 mientras que los puntos en rojo corresponden a un fold de 2, las celdas en blanco están vacías. Notar cómo el cubrimiento posee unas zonas con huecos y otras con fold no unitario.

Se puede agregar una tercera condición, la cual establece que los rangos de datos utilizados en cada agrupamiento sean lo suficientemente reducidos para evitar la pérdida de resolución por efecto de mezcla. Esta condición se alcanza a partir de diseños más densos (reduciendo el espaciamiento entre líneas fuentes y de receptoras) factibles de realizar hoy en día gracias a las nuevas tecnologías de adquisición.

Agrupamiento COV (common offset vector)

Como se ha ilustrado previamente, el agrupamiento en COFF no cumple las condiciones establecidas para las adquisiciones 3D típicas. No obstante, dichas condiciones se satisfacen cuando nos referimos a adquisiciones 2D, es decir, es viable lograr agrupamientos en rangos de offsets de manera que sea posible alcanzar secciones completas de fold unitario. Por ejemplo, para adquisiciones 2D con spread asimétrico, se puede demostrar que un rango de offsets igual al doble de la distancia entre disparos permite alcanzar el objetivo (Fig. 6). Si consideramos un spread simétrico el rango de offsets se reduce a la mitad.

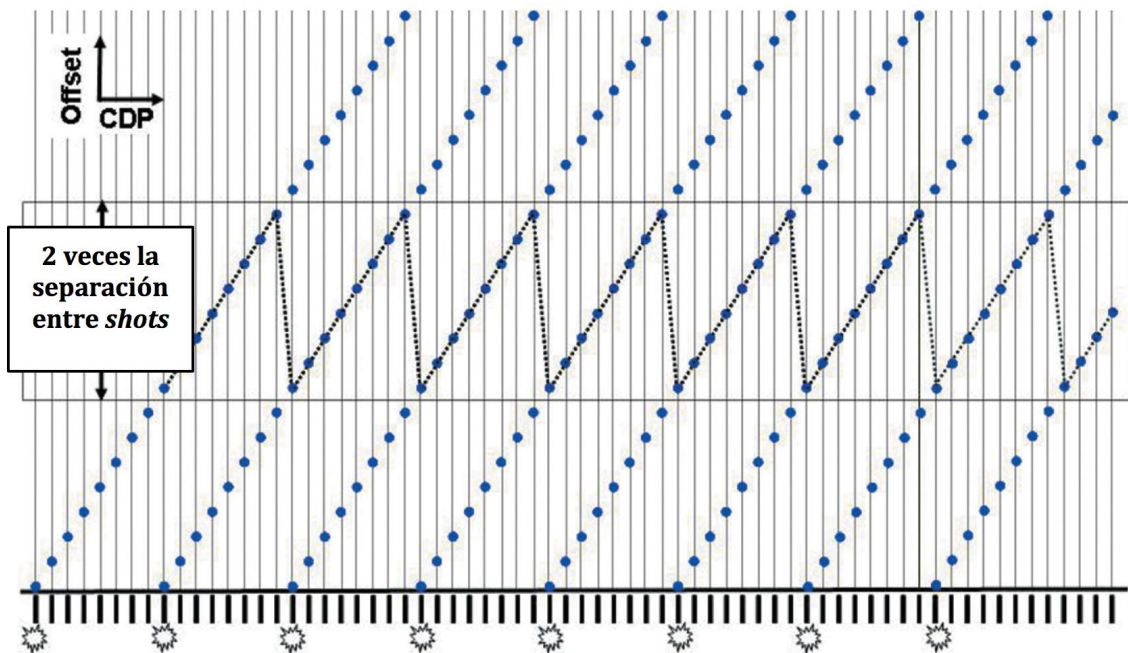


Figura 6. Diagrama de apilado para una línea 2d con spread asimétrico y su rango de offsets óptimo. (Xinxiang Li, 2008)

Es posible extender este concepto para adquisiciones 3D si se visualiza cada CMP como parte de dos líneas 2D ortogonales generadas a partir de registros y receptores paralelos a cada línea (Fig. 7).

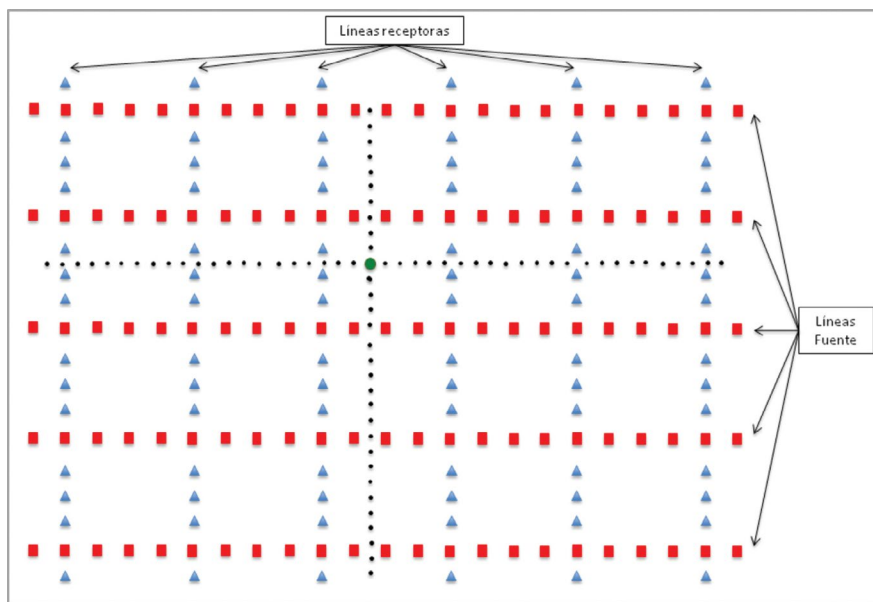


Figura 7. Interpretación de un CMP 3D como parte de 2 líneas ortogonales 2D

Es posible conjeturar que una de las líneas 2D tendrá las fuentes ubicadas paralelas a la línea de receptores (dirección inline) mientras que la otra las tendrá paralelas a la línea de fuentes (dirección crossline). Recordando las condiciones necesarias para obtener rangos de offset ideales en 2D (el doble del espaciamento entre fuentes), se pueden entonces imaginar rangos de offset en los sentidos de las inlines y las crosslines iguales al doble del espaciado entre líneas de fuentes y receptoras respectivamente, los cuales constituyen las bases del ordenamiento COV (Figs. 8 y 9). Los valores máximos de offset en cada sentido estarán determinados por el tamaño del patch de adquisición.

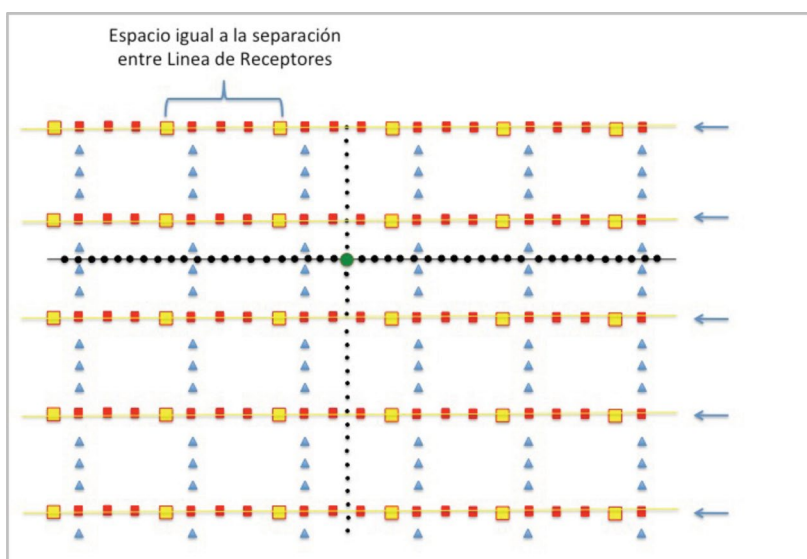


Figura 8. Los registros marcados de izquierda a derecha forman la pseudo línea 2D resaltada a partir de la cual se pueden calcular los rangos de offset crossline.

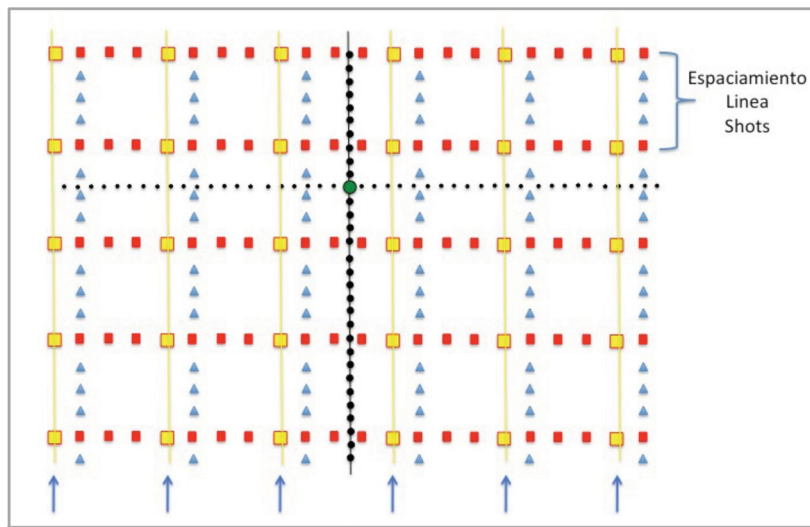


Figura 9. Los registros marcados desde abajo hacia arriba forman la pseudo línea 2D resaltada a partir de la cual se pueden calcular los rangos de offset inline.

Este nuevo agrupamiento, considerando un offset inline y un offset crossline, permite alcanzar las condiciones de continuidad y fold unitario (escogiendo los rangos cuidadosamente en base a las condiciones establecidas previamente). El producto entre la cantidad de rangos de offset en el sentido inline y en el sentido crossline, permite obtener el fold nominal de adquisición.

Una de las dificultades para implementar este ordenamiento en el pasado radicaba en el hecho que los rangos de offset podrían llegar a ser demasiado amplios (especialmente hacia offsets más largos). Las nuevas tecnologías de adquisición han permitido realizar diseños más densos gracias a espaciamientos entre líneas fuentes y entre líneas receptoras más reducidos y fold elevado, siendo posible mitigar este inconveniente, especialmente al aplicar el concepto de reciprocidad fuente-receptor, donde se pueden combinar dos COVs de direcciones opuestas con los mismos rangos de offset para formar COVs más pequeños (Herrmann et al, 2007). Esta reducción del rango de offsets mediante el concepto de reciprocidad es equivalente a la reducción del rango de offsets 2D al considerar spreads simétricos.

Algoritmo de Interpolación 5D

Para comprender el concepto subyacente bajo el algoritmo de interpolación 5D, es necesario remitirse en primer lugar a su componente fundamental, la transformada de Fourier.

El teorema de Fourier establece que se puede representar cualquier señal compleja como la suma de señales sinusoidales armónicas, cada una con una amplitud, frecuencia y fase característica. La transformada de Fourier permite, mediante un operador matemático, obtener esas señales sinusoidales. De esta manera es posible transformar datos representados en el dominio temporal al dominio de la frecuencia (siendo esta la frecuencia de las componentes sinusoidales

que representan la señal original). Análogamente podemos extender el concepto de este operador a la transformación de datos del dominio espacial al dominio de la frecuencia espacial o número de onda.

Finalmente, el dato en el dominio de Fourier puede ser reconstruido nuevamente en el dominio temporal mediante la transformada inversa. Un aspecto destacable del método radica en la posibilidad de reconstruir el dato en cualquier posición deseada y no necesariamente en un espaciamiento regular (Fig. 10).

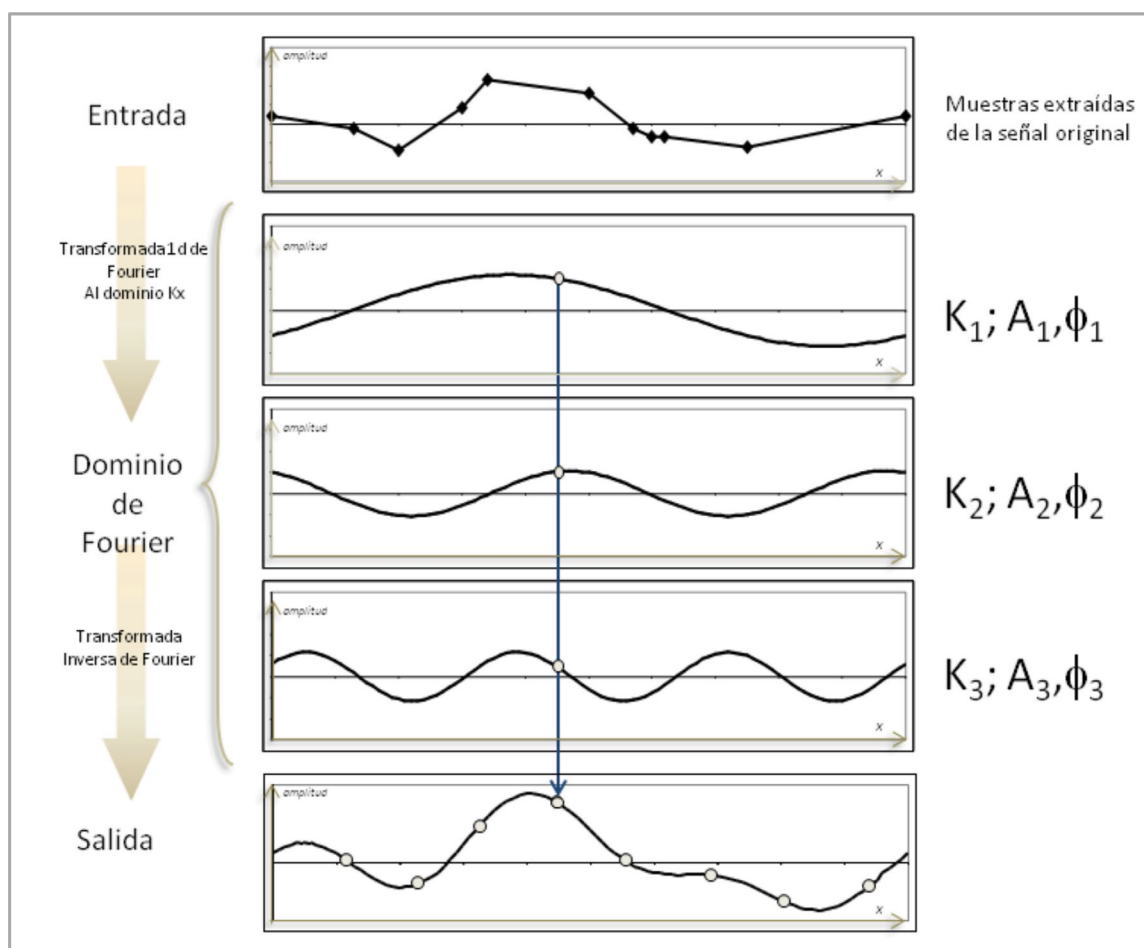


Figura 10. Procedimiento básico de interpolación mediante transformada de Fourier 1D. Notar cómo es posible reconstruir el dato en cualquier posición.

Los esquemas básicos mencionados anteriormente funcionan para una señal representada por una sola dimensión o 1D pero, ¿qué sucede si se quiere extender el concepto para representar una traza sísmica? Se debe considerar entonces que cada muestra de dicha traza estará representada por varias dimensiones.

Es necesario ampliar entonces el concepto de interpolación 1D a dos y tres dimensiones, creando analogías en el espacio f - Kx - Ky (Fig. 11).

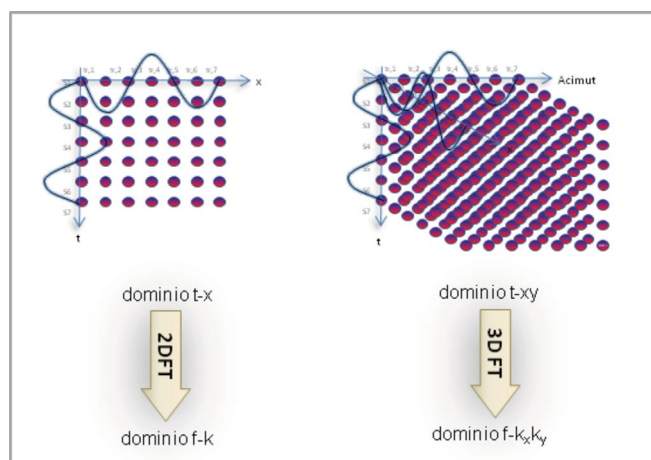


Figura 11. Extensión del concepto de interpolación 1D a dos y tres dimensiones.

Es factible extender este concepto incluso a más dimensiones. En particular, considerando una interpolación en COV, cada muestra estará representada por un tiempo, su localización en función de una inline y una crossline, y los correspondientes offsets inline y crossline, totalizando así las 5 dimensiones que caracterizan al algoritmo de interpolación 5D.

La mayoría de los algoritmos de migración requieren una distribución regular de los datos de entrada para minimizar cualquier posible artefacto de migración. Bajo esta condición, la aplicación del algoritmo no solo como interpolador sino como regularizador del dato es de fundamental importancia.

Dominios de salida

El algoritmo de interpolación 5D puede implementarse tanto en superficie como en sub-superficie. Para el primer caso el dato es organizado en orden shot, es decir, reconstruye el dato original en función de su ubicación en superficie, pudiéndose además agregar líneas de fuente o receptores, recuperar registros faltantes, etc.

La interpolación en sub-superficie reconstruye el dato en orden CMP. Aquí se pueden escoger diferentes maneras de organizar el dato, ya sea en forma cartesiana a través de un offset inline y crossline (nuestro COV), o en forma polar representando el mismo mediante un offset y un acimut específico (common offset-common azimuth o COCA). Las diferentes implementaciones de la interpolación se refieren entonces a cómo se desee representar el dato de salida (Fig. 12).

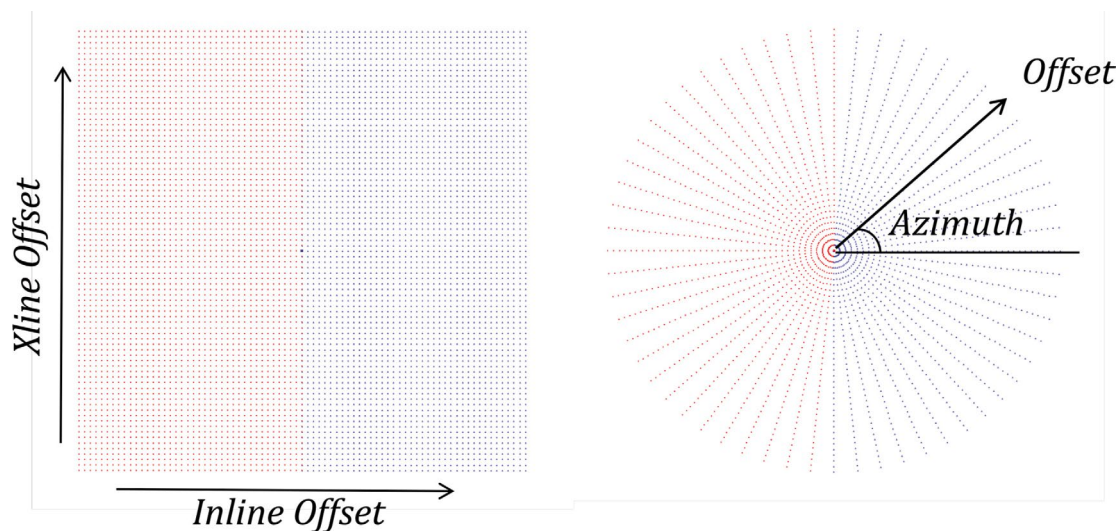


Figura 12. Distintos modos de interpolación en sub-superficie. A la derecha se muestra el ordenamiento en common offset vector (COV) y a la izquierda el ordenamiento en common offset-common azimuth (COCA)

METODOLOGÍA DE PROCESO

Aplicación del algoritmo de Interpolación 5D

Para el presente trabajo se implementó la interpolación 5D en sub-superficie con una distribución en common offset vector o COV.

Se tomó el spread de salida en base a los parámetros de registración más completos (con el espaciado entre líneas de fuentes de 160 m), con la siguiente definición:

Inline Offset:	-1120 m a 1120 m cada 320 m (8 clases)
Crossline Offset:	80 m a 1200 m cada 160 m (8 clases)

Acorde a lo establecido previamente, el producto de la cantidad de rangos en las direcciones inline y crossline es igual al fold nominal del proyecto.

La aplicación del teorema de reciprocidad implica que la señal sísmica obtenida a partir de un par fuente-receptor es la misma al intercambiar la posición de uno por el otro. Esto representa una importante ventaja ya que permite utilizar la información sísmica contenida en un determinado cuadrante para completar la información de entrada a interpolar en el cuadrante recíproco (equivalente a intercambiar las posiciones de shots y receptores). Nótese entonces cómo adicionalmente, aplicando el concepto de reciprocidad, se redujo el rango de offsets crossline a la mitad (de 320 a 160 metros) a fin de compensar el aumento del espaciado entre líneas fuente al noroeste del proyecto. En la figura 13 se observa el mapa de localización de fuentes y receptores antes y después de interpolar en COV.

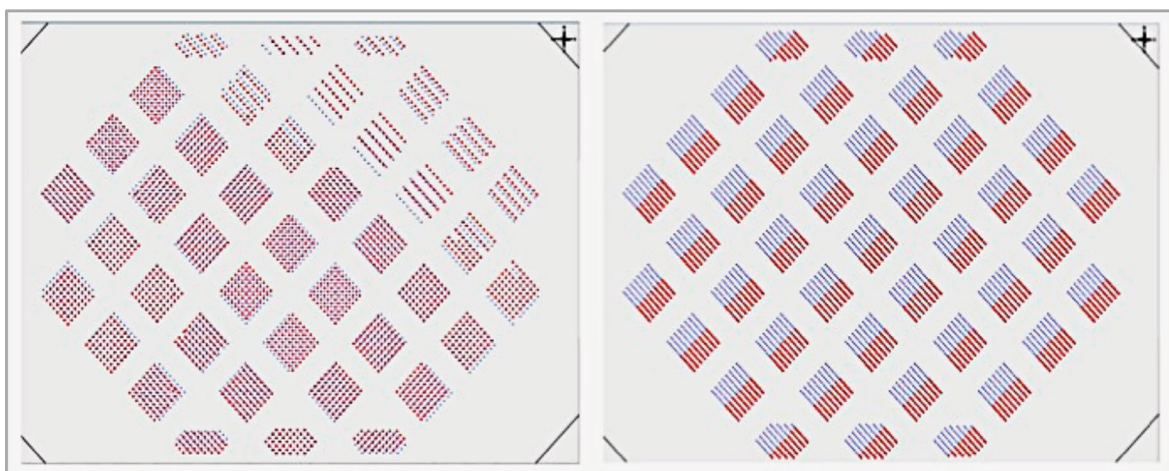


Figura 13. Selección de CMPs de entrada a la interpolación (izquierda) y las mismas posiciones interpoladas (derecha)

Con el objeto de honrar las posibles variaciones de amplitud y velocidad con el offset y/o acimut, fue preciso interpolar la señal sísmica dentro del rango original de offsets proyectados contenido en la geometría de adquisición. Por tal motivo los offsets resultantes han sido limitados de acuerdo al spread de entrada.

Adicionalmente, la interpolación 5D permite obtener gathers completos y con una mejor relación señal/ruido (Fig. 14), lo cual favorece el funcionamiento del algoritmo de migración, generando datos migrados de mejor calidad y que resultarán de utilidad para estudios posteriores (AVO, AVAZ, etc.).

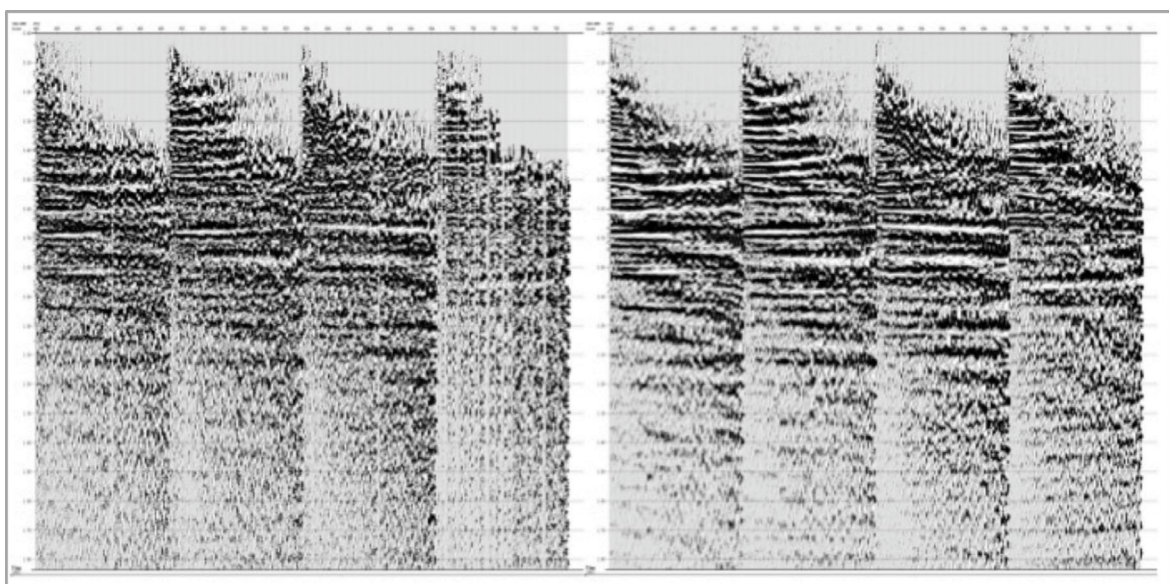


Figura 14. Gathers de entrada a la interpolación (izquierda) e interpolados (derecha).

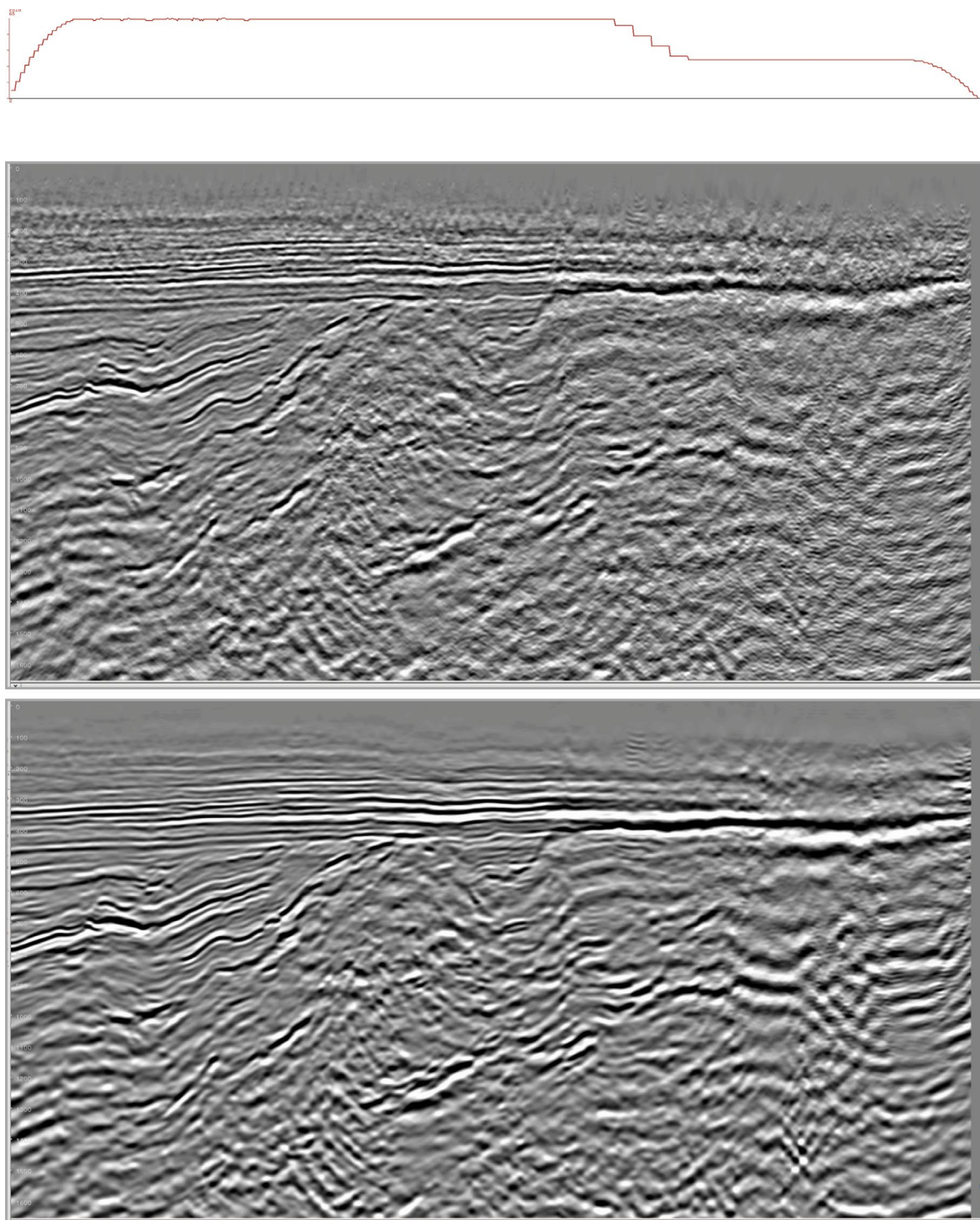


Figura 15. Fold de entrada previo a la interpolación (arriba). Sección sísmica migrada PSTM en planos de offset sin interpolar (centro) y la misma sección migrada en planos COV con interpolación 5d (abajo)

Migración PSTM de datos interpolados y sin interpolar

Dado que el algoritmo de interpolación 5D reconstruyó el dato en el dominio COV, y debido a las ventajas que presenta este dominio, se migró PSTM cada uno de los planos COV interpolados.

Con el objeto de evaluar la efectividad del procesamiento mediante interpolación 5D se realizó un procesamiento paralelo del dato sísmico a través del método convencional de migración en planos de offset.

Para la migración de los datos en offset común o COFF, se escogieron entonces planos de migración en rangos de offset cada 60 metros con un máximo de 1800 metros, totalizando 30 planos. Adicionalmente debió aplicarse una compensación de amplitudes debido a la distribución irregular de los CMPs en los rangos de offset de entrada (fold no unitario y con huecos).

Para garantizar la imparcialidad de las pruebas realizadas, los datos de entrada a la migración PSTM difieren únicamente en el empleo del interpolador 5D, mientras que comparten el mismo flujo de procesamiento, estáticas y velocidades.

Ambos datos migrados fueron sumados con los mismos parámetros para obtener sendos volúmenes de migración con y sin interpolación previa. A continuación se procedió a evaluar las imágenes PSTM y los cubos de atributos sísmicos obtenidos a partir de dichos volúmenes.

RESULTADOS

Comparación de los productos post-migración

El objetivo primario del procesamiento de datos sísmicos para este proyecto consiste en la interpretación de las imágenes migradas en busca de trampas estratigráficas y/o estructurales someras. En virtud de dicho objetivo cobra gran importancia alcanzar un nivel de detalle en la sísmica que permita discriminar la señal respecto al ruido de fondo, ya sea ruido aleatorio o ruido coherente generado por las marcas de adquisición (footprint).

El producto interpolado 5D y migrado en COV presenta una disminución notable de los artefactos generados comparado con la migración en planos de offset, especialmente en la zona donde se duplica el espaciado entre líneas fuente y el fold de entrada cae a la mitad (Fig. 15).

A nivel de time-slice la diferencia se centra ahora en la existencia de marcas de adquisición (footprint) en la migración en COFF, las cuales se reducen en gran medida gracias a la interpolación, permitiendo discriminar y analizar con mayor detalle estructuras o canales que de otra manera son muy difíciles de interpretar (Fig. 16).

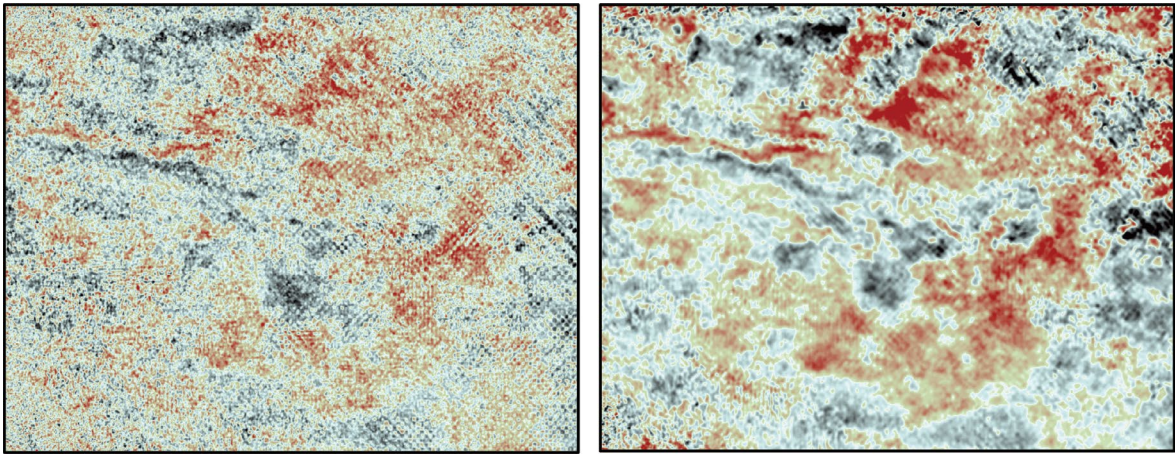


Figura 16. Time Slice a 220 ms de la PSTM sin interpolar (izquierda) y la misma imagen migrada en planos COV con interpolación 5d (derecha)

Para complementar el análisis efectuado sobre la imagen migrada se calcularon atributos que facilitan el análisis e interpretación de determinados rasgos geológicos. Estos atributos también se ven beneficiados por la interpolación de los datos de entrada gracias a la mejora de la relación señal/ruido y la disminución del footprint (Figs. 17 y 18).

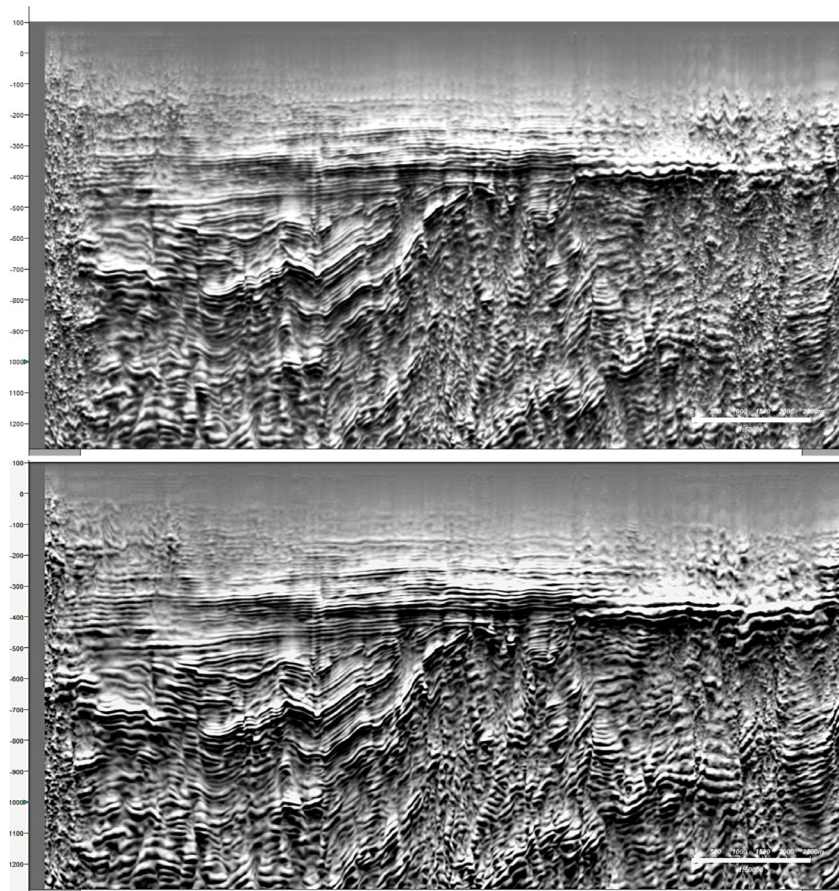


Figura 17. Vista en sección del atributo AVT (Amplitude Volume Technique) calculado sobre la migración sin interpolar (arriba) y sobre la migración con interpolación 5d (abajo).

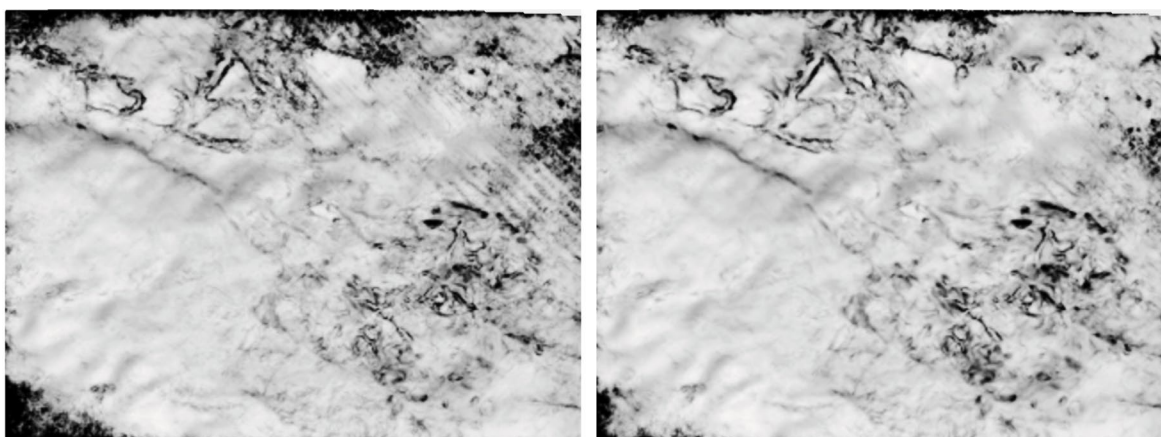


Figura 18. Horizon Slice (discordancia Intersenoniana) del atributo Varianza calculado sobre la migración sin interpolar (izquierda) y sobre la migración con interpolación 5d (derecha).

CONCLUSIONES

La implementación de la regularización / interpolación 5D en el dominio COV fue clave para mejorar sustancialmente la imagen migrada mediante un acondicionamiento óptimo de la información de entrada a la migración. Por otra parte, permitió mejorar la calidad de los atributos sísmicos, principalmente debido a la atenuación de las marcas de registración (footprint) y a un incremento en la relación señal/ruido del dato de entrada a la migración.

La elección del dominio COV posibilitó que la geometría de migración prestack tuviera una cobertura total en sub-superficie, mejorando el enfoque del operador de migración como así también la imagen estructural, conservando a la vez las amplitudes relativas del dato.

A diferencia de la migración en planos de offset, los gathers migrados en planos COV presentan la ventaja adicional de preservar tanto la información de offset como de acimut, por lo cual se pueden utilizar no solo para estudios de AVO, sino que también son aptos para estudios de variaciones acimutales de velocidad y amplitudes (AVA/VVAZ).

Un resumen de las principales características que marcan las diferencias entre las secuencias de migración vistas puede observarse en la tabla de la figura 19.

	MIGRACION PSTM	
	COFF	COV + INTERP 5D
Agrupamiento con celdas de <i>fold</i> unitario	No	Si
Cobertura en Sub-superficie	Incompleta	Total
Información acimutal	No	Si
Regularización de datos en sub-superficie	No	Si
Compensación de amplitudes por variación de <i>fold</i>	Necesaria	No necesaria

Figura 19. Diferencias entre el producto PSTM sin interpolar y aquel migrado en planos COV con interpolación 5d.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Pluspetrol, GeoPark y Emesa por permitir la publicación de los resultados de este trabajo.

A su vez expresamos nuestro agradecimiento para con Jorge Sanchez, Gustavo Vergani, Pablo Kim y Leandro Venara por sus críticas y sugerencias y a María Silvia Castro por generar los mapas de ubicación del área de estudio.

REFERENCIAS

- Xinxiang Li, 2008, An introduction to common offset vector trace gathering, CSEG RECORDER, Nov. 2008, 28-34
- Cary, P.W., 1999, Common-offset-vector gathers: an alternative to cross-spreads for wide azimuth 3-D surveys, 69th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, paper SPRO P1.6.
- Cary, P.W. and Li, X., 2001, Some basic imaging problems with regularly-sampled seismic data, 71st Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, pp. 981-984
- Cooper, J., Margrave, G., and Lawton, D., 2008, Simulations of Seismic Acquisition Footprint, Expanded Abstracts CSEG 2008 annual meeting, 160-164.
- Gesbert, S., 2002, From acquisition footprints to true amplitude, Geophysics, 67, 830- 839.
- Padhi, T., and Holley, T.K., 1997, Wide azimuths, why not?, The Leading Edge, 16, 175-177.
- Perz, M., and Zheng, Y., 2008, Common-offset and common offset-vector Migration of 3D Wide Azimuth Land Data: A Comparison of Two Approaches, Expanded Abstracts CSEG 2008 annual meeting, 167-171.
- Vermeer, Gijs J.O., 1998, Creating image gathers in the absence of proper common-offset gathers: Exploration Geophysics (ASEG Conference issue), 29, 636-642. (available at <http://www.3dsymsam.nl/publicat.htm>)
- Vermeer, Gijs J.O., 2000, Processing with offset-vector-slot gathers: 70th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, paper ACQ1.2.
- Vermeer, Gijs J.O., 2005, Processing orthogonal geometry – what is missing?: 75th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, paper SPNA 2.9.