

GEOMORFOLOGÍA SÍSMICA MEDIANTE DESCOMPOSICIÓN ESPECTRAL PARA EL ENTENDIMIENTO DEL MODELO GEOLÓGICO DEL GRUPO CUYO EN LA CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA

Daniel Sánchez¹, Teresa Santana¹, Walter Brinkworth¹

1: YPF S.A., daniel.sanchez@ypf.com, teresa.santana@ypf.com, walter.brinkworth@ypf.com

Palabras clave: descomposición espectral, grupo Cuyo, atributos sísmicos

ABSTRACT

Spectral decomposition provides a method to utilize seismic data and the discrete Fourier transform (DFT) for delineating temporal bed thickness and geological discontinuities using 3D seismic data. By transforming the seismic data into the frequency domain via DFT, the amplitude spectra delineate temporal bed thickness variability while the phase spectra indicate lateral geologic discontinuities. The spectral content of seismic data is influenced by the acoustic properties in the Earth, and therefore significant information can be gained from the analysis of the seismic at different frequencies through spectral decomposition during seismic interpretation. The ability to examine and compare the response at different frequency bands is critical to obtain information that otherwise is difficult to visualize on the full bandwidth data. This signal analysis technology has been used successfully in 3D seismic surveys to delineate stratigraphic settings such as channelized features and structural settings with complex fault systems. Volumetric RGB (Red-Green-Blue) blends of the optimum frequency cubes rapidly assess and highlight the presence of geological features present in the seismic data. Seismic geomorphology facilitates the study of the subsurface by the extraction of geomorphologic insights from 3D seismic data. Spectral decomposition is a powerful technique to be used during seismic interpretation that allows the interpreter to quickly and effectively detect subtle discontinuities within large 3D surveys that otherwise remains hidden in the seismic data. This study demonstrates the added value of spectral decomposition volume interpretation to help delineate the geological model at various scales, from Exploration to Development studies. In the present work, a methodology to search, individualize, interpret and extract geobodies in 3D volume is proposed. Examples from the Grupo Cuyo in the Neuquén basin, Argentina are presented.

INTRODUCCIÓN

En el presente estudio, se aplica una metodología de trabajo utilizando la descomposición espectral volumétrica con el objetivo de buscar, individualizar, interpretar y extraer geocuerpos que ayuden a la comprensión y poblado del modelo geológico del Gr. Cuyo sobre todo en las zonas profundas donde el dato de pozo es escaso.

Una señal sísmica está compuesta por una serie o suma de señales de diferentes frecuencias. La técnica geofísica de descomposición espectral consiste en analizar y descomponer una señal

sísmica en sus componentes espectrales o frecuencias constituyentes para analizar la respuesta asociada a cada una de ellas. La metodología de descomposición espectral *Blend RGB (Red-Green-Blue)* permite agrupar señales con frecuencias bajas, medias y altas asignándoles los colores rojo, verde y azul respectivamente para resaltar diferentes aspectos y características del dato sísmico observados para cada una de las frecuencias (Hall y Trouillot 2004). De esta manera, se enfatizan eventos sísmicos con diversas características geológicas endiferentes grupos de frecuencias, los cuales generalmente están ocultos o son difíciles de reconocer al usar el ancho de banda completo en amplitud (Chopra y Marfurt 2007).

Se presentan ejemplos de los resultados obtenidos.

METODOLOGÍA

Existen metodologías tradicionales ampliamente utilizadas en interpretación sísmica, como la horizontalización de volúmenes de amplitud utilizando superficies de referencia, la extracción de atributos, etc., utilizados para resaltar características geológicas presentes en el dato sísmico.

En el presente trabajo, se aplica una metodología alternativa para identificar, interpretar y extraer geocuerpos de la sísmica 3D en forma volumétrica utilizando la descomposición espectral del dato sísmico y el volumen *Blend RGB* de frecuencias óptimas de acuerdo con la zona de interés a investigar.

El flujo de trabajo propuesto consta de tres etapas (Fig. 1), que se describen a continuación:

1. Establecer los parámetros óptimos para la descomposición espectral de acuerdo con los objetivos geológicos de interés para la elaboración del *Blend RGB*. Análisis “*on the fly*” de volúmenes *Blend RGB* alternativos, utilizando diferentes bandas de frecuencias bajas, medias y altas
2. Interpretación semiautomática de los geocuerpos identificados.
3. Extracción volumétrica de los geocuerpos y su posterior inserción en el modelo geológico 3D

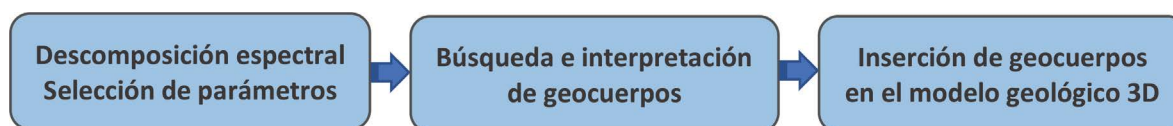


Figura 1. Flujo de trabajo propuesto

En determinadas zonas con poca densidad de pozos se utilizó esta metodología para alimentar el modelo geológico, aportando información sobre las geometrías y tamaños que constituyen la arquitectura del nivel de interés, pues será indicador de la posible presencia de áreas potenciales para la prospección de hidrocarburos.

Etapas 1: Descomposición espectral, selección de parámetros

La primera y más importante etapa en el flujo de trabajo propuesto es determinar el intervalo de interés donde se prevé la existencia de geocuerpos, ya sea por conocimiento geológico del área, por rasgos identificados mediante métodos tradicionales de interpretación sísmica o a través de la investigación de patrones específicos dentro de las características geomorfológicas observadas en la sísmica que podrían indicar valles incisos, cañones submarinos, barras, etc. La interpretación de un horizonte de referencia cercano al intervalo de interés es crítica, como así también la calidad de su interpretación. La distancia del horizonte de referencia respecto del rasgo geológico a analizar dependerá de la deformación estructural y la complejidad estratigráfica del área (Fig. 2A).

El espectro de frecuencia en la zona de interés se obtiene del volumen sísmico horizontalizado al nivel de referencia (Fig. 2B). Sobre éste se extrae el espectro de frecuencia, al que se lo descompone en un número de bandas a criterio del intérprete (ocho en el ejemplo de Fig. 2C) y se seleccionan las tres más representativas que mejor definan las características geológicas de la zona a analizar.

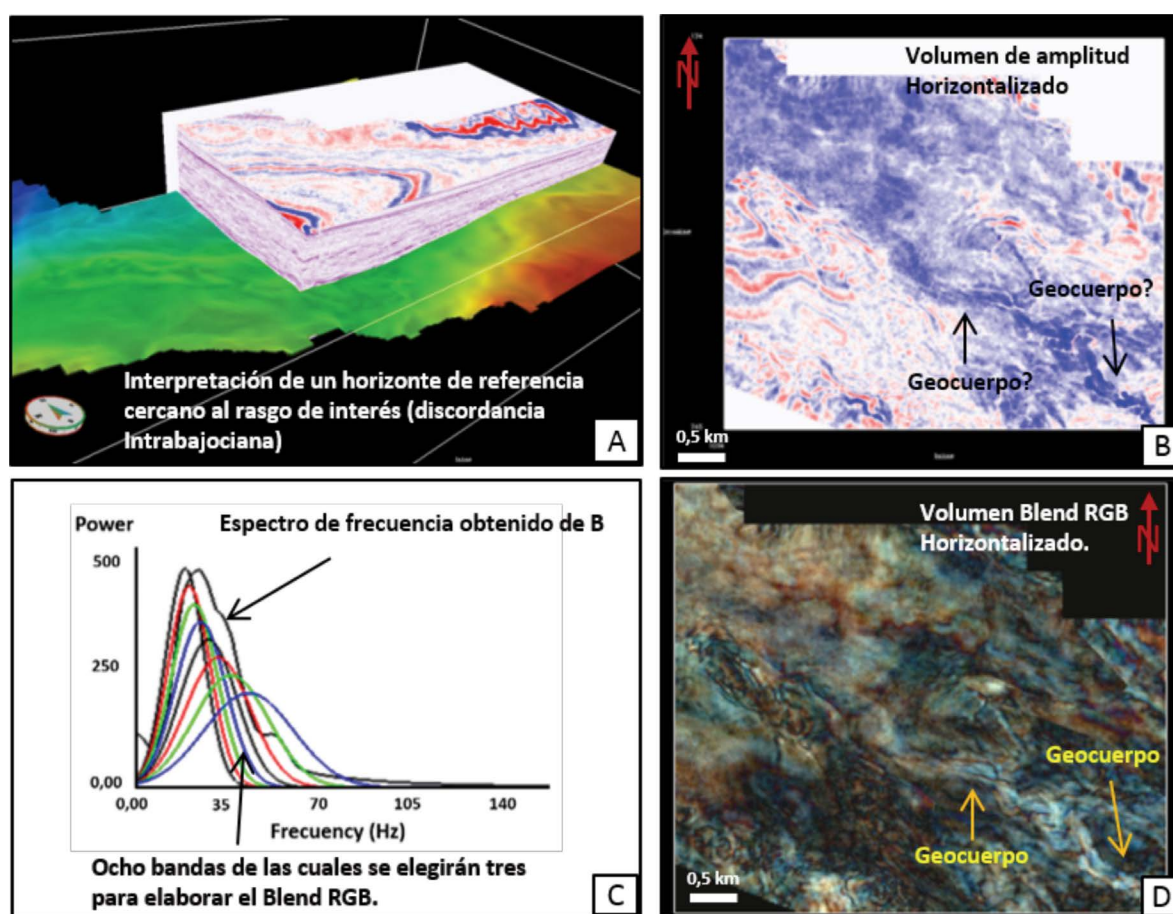


Figura 2. Flujo de trabajo propuesto, Etapa 1: Descomposición espectral, selección de parámetros. A: Selección del área de interés, interpretación del horizonte de referencia; B: Horizontalización del volumen sísmico al horizonte de referencia; C: Extracción del espectro de frecuencia para el horizonte de referencia; D: Análisis interactivo "on-the-fly" en el Blend RGB, utilizando tres bandas de frecuencia.

En la Fig. 2C se muestra con una flecha el espectro de la sísmica y la descomposición propuesta.

La técnica Blend RGB permite combinar las tres bandas seleccionadas asignándole un color específico (Rojo-Verde-Azul) a cada una. Este proceso se realiza de manera interactiva para que el intérprete explore varias alternativas de posibles arreglos de frecuencia y finalmente seleccione el Blend RGB óptimo (Fig. 2D). Cuando se selecciona la combinación óptima de frecuencias, se genera el Blend RGB final que se utilizará durante la interpretación.

Etapas 2: Búsqueda e interpretación de geocuerpos

Durante esta etapa, se inicia la búsqueda de geocuerpos en la zona de interés utilizando el Blend RGB generado con las frecuencias óptimas seleccionadas durante la Etapa 1 (Fig. 3A). Se individualizan las características estratigráficas y la interpretación volumétrica se lleva a cabo mediante el uso de clusters (semillas) de dimensiones específicas según el objetivo (Fig. 3B) que se propagan de manera semiautomática siguiendo los valores de frecuencia del volumen *Blend* RGB (Fig. 3C). Los geocuerpos se convierten en horizontes para su futuro análisis, interpretación e inserción en el modelo geológico 3D (Fig. 3D).

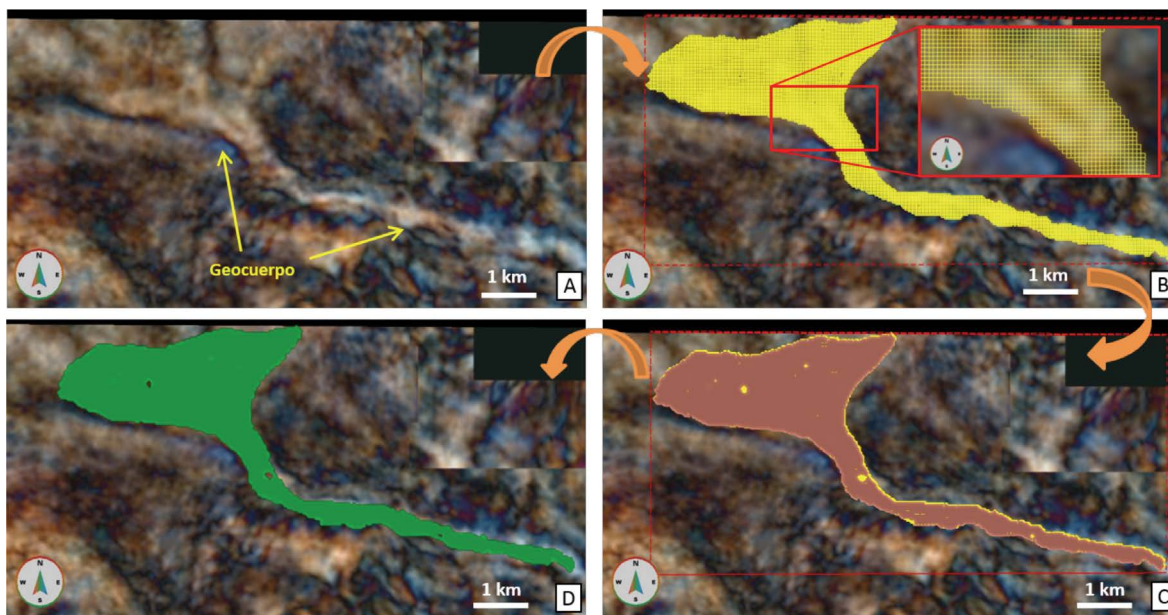


Figura 3. Flujo de trabajo propuesto, Etapa 2: Búsqueda e interpretación de geocuerpos. A: Individualización del geocuerpo. B: Interpretación volumétrica semiautomática mediante el uso de clusters (semillas). C: Propagación volumétrica de clusters siguiendo los valores de frecuencias del Blend RGB. D: Conversión del geocuerpo en horizonte para su inserción en el modelo geológico.

Etapas 3: Inserción de geocuerpos en el modelo geológico 3D

La etapa final consiste en la extracción del geocuerpo interpretado y su inserción en el modelo geológico 3D. Los geocuerpos se convierten en horizontes y se restauran a su posición original

(hasta el momento se encuentran horizontalizados al nivel de referencia para la zona de interés) para su posterior análisis en el modelo geológico y/o interpretación sísmica (Fig. 4A).

El control de calidad de los geocuerpos mapeados utilizando el volumen sísmico original (sin horizontalizar), debe llevarse a cabo como un paso crítico para verificar que los mismos se correspondan efectivamente a rasgos geológicos, verificando que estén contenidos dentro de un reflector (Figs. 4B y 4C) y por lo tanto sigan líneas tiempo. Durante el estudio, algunos geocuerpos, aproximadamente el 20%, fueron descartados ya que atravesaban estas líneas tiempo.

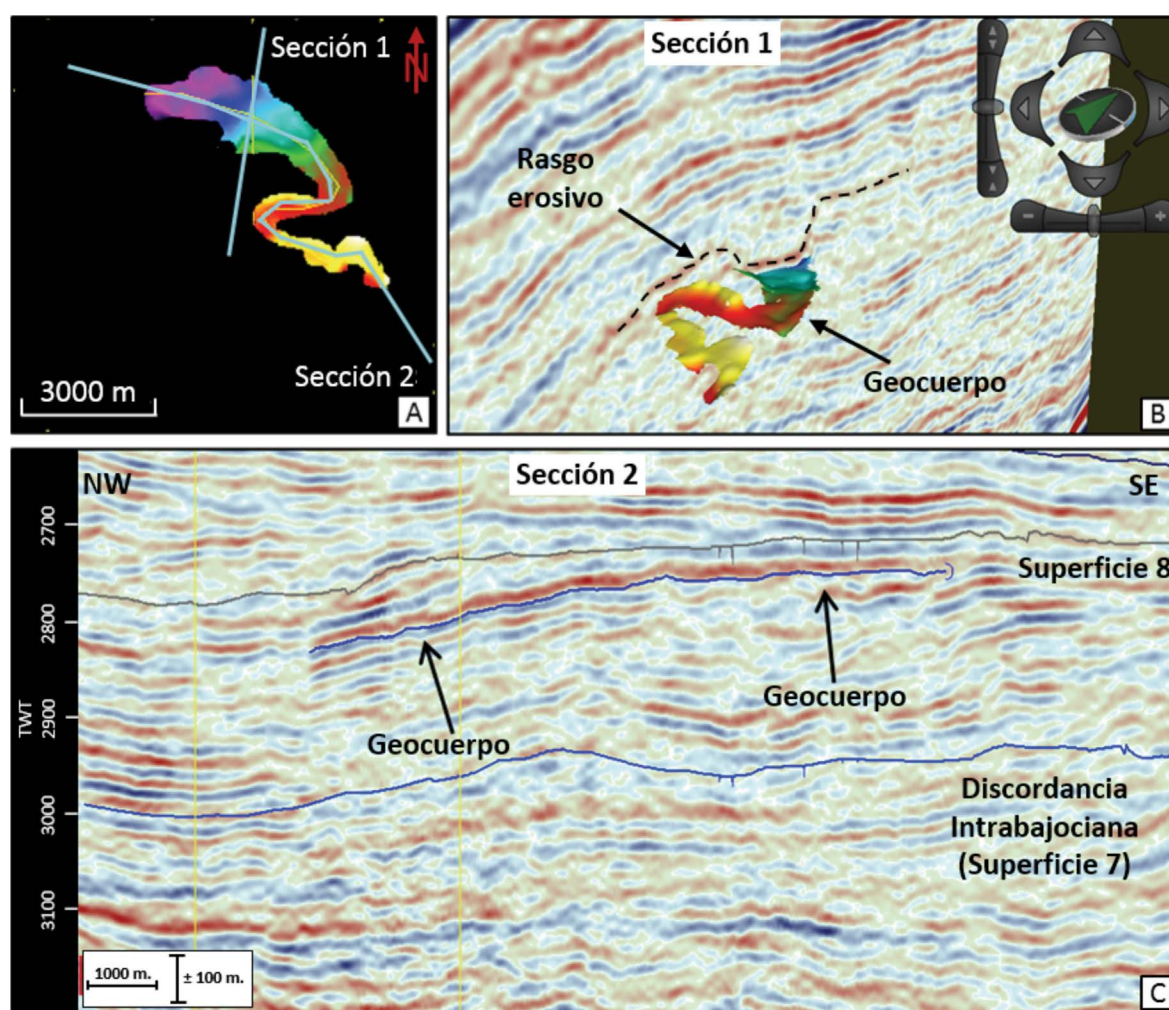


Figura 4. Flujo de trabajo propuesto, Etapa 3: Inserción del geocuerpo en el modelo geológico 3D. A: Vista en planta del geocuerpo con la ubicación de las secciones 1 y 2 para control de calidad. B: Vista 3D del geocuerpo atravesando la Sección 1. C: Sección 2 de control de calidad a lo largo del geocuerpo identificado, indicando su concordancia con el reflector sísmico (superficies 7 y 8 corresponden a subdivisiones de Brinkworth *et al.*, 2017).

CASO DE ESTUDIO: GRUPO CUYO, CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA

Se presenta como caso de estudio, el trabajo realizado para la síntesis regional del Grupo Cuyo utilizando el flujo de trabajo aquí descripto.

El Grupo Cuyo (Dellape *et al.*, 1979) es una secuencia silicoclástica del Jurásico Inferior y Medio, compuesta por depósitos marinos profundos, marinos someros y continentales delimitados por las discordancias regionales Intraliásica e Intracalloviana respectivamente. De manera muy simplificada por no ser objetivo de este trabajo, está integrado por tres formaciones litioestratigráficas: Molles, Lajas y Challacó (Punta Rosada). Se encuentra ubicado sobre el Grupo Precuyano, compuesto de rocas piroclásticas, volcánicas y epiclásticas, y está cubierto por el Grupo Lotena, compuesto de sedimentos silicoclásticos, carbonatos y evaporíticos (Arregui *et al.* 2011) (Fig. 5). El incremento en la subsidencia térmica, la conexión con el océano paleoPacífico y un suministro continuo de sedimentos de áreas adyacentes, controlaron el desarrollo de varios ciclos transgresivos-regresivos a lo largo de sus 2500 metros de espesor (Legarreta *et al.*, 1989).

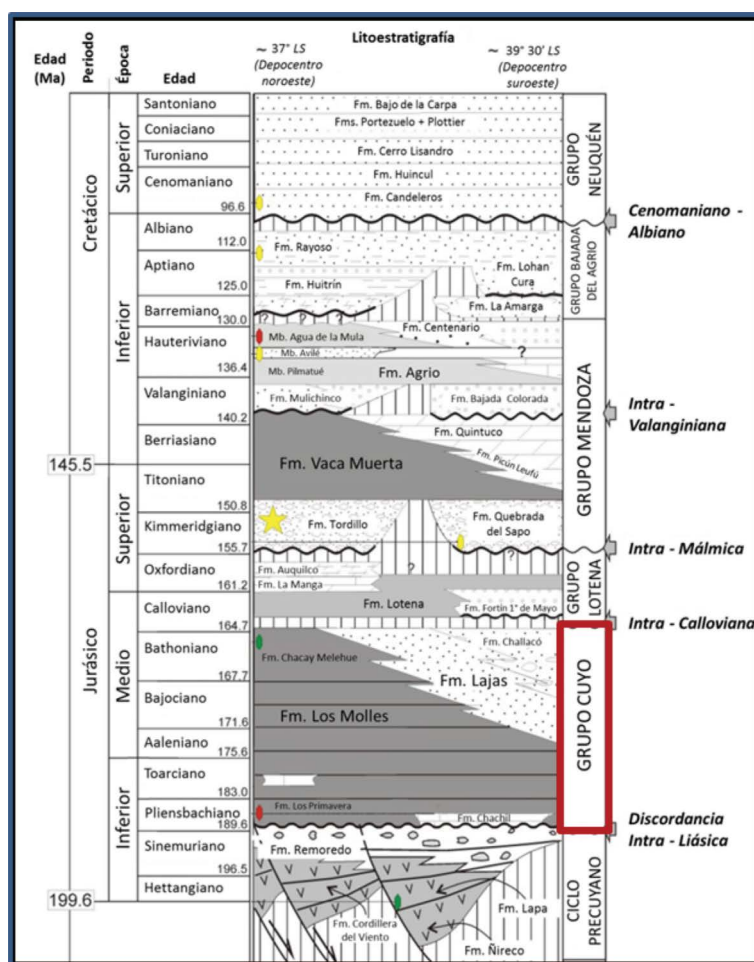


Figura 5. Esquema estratigráfico de la Cuenca Neuquina. Modificado por Brinkworth *et al.*, 2017

La interpretación sísmica cronoestratigráfica regional permitió la identificación de nueve ciclos sedimentarios (Fig. 6), (Brinkworth *et al.* 2017). El tope del Ciclo VII es la discordancia Intrabajociana (Superficie 7 de las Figuras 4 y 13). Este representa una caída del nivel del mar que

generó erosiones en las áreas de plataforma y talud, claramente observables en secciones sísmicas. Algunos de los ejemplos aquí mostrados fueron interpretados próximos a estos niveles (Figuras 9, 10 y 11).

Otras características geológicas del grupo Cuyo resaltadas por este atributo incluyen los abanicos submarinos y canales submarinos en el área del talud, que en muchos casos rellenan los cañones generados por las erosiones descritas anteriormente (Loss *et al.*, 2018) o por caídas del nivel del mar y presencia de deltas en los quiebre de talud que favorecieron la entrega de sedimentos a la cuenca profunda.

La geomorfología sísmica (Posamentier *et al.* 2007) basada en la descomposición espectral volumétrica se utilizó para realizar un análisis detallado de estas características permitiendo mapear con detalle dichos rasgos geológicos en forma volumétrica para el Grupo Cuyo.

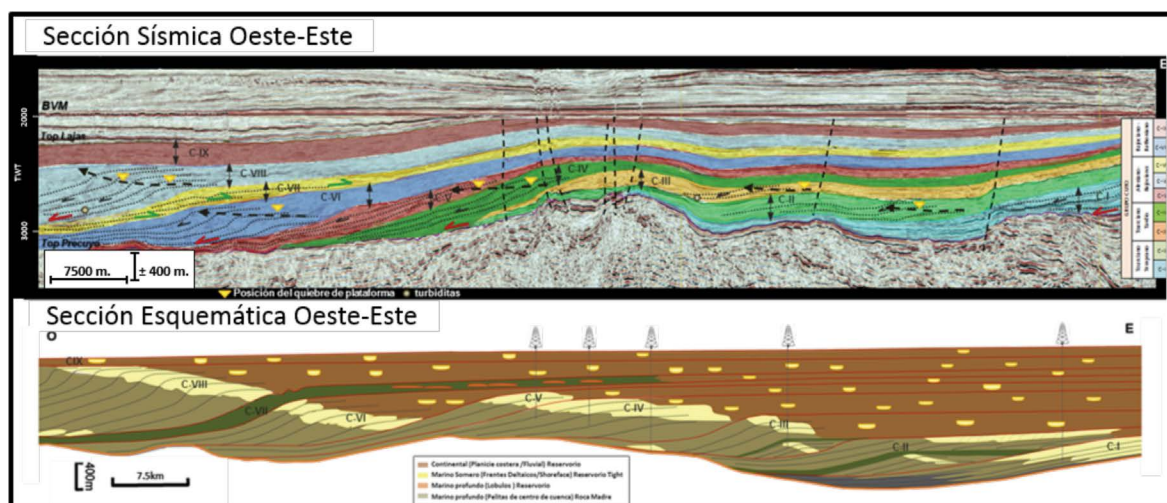


Figura 6. Interpretación de secciones sísmicas y secciones esquemáticas de la evolución paleoambiental del Grupo Cuyo (Brinkworth *et al.*, 2017).

RESULTADOS, CASO DE ESTUDIO

Las metodologías de interpretación tradicionales, comola búsqueda de geocuerpos utilizando volúmenes de amplitud horizontalizados y la extracción de amplitudes RMS, fueron utilizadas con escaso éxito para identificar geometrías y dimensiones de rasgos estratigráficos para el Grupo Cuyo en la cuenca Neuquina hasta el presente. La metodología de descomposición espectral volumétrica propuesta fue implementada como herramienta de soporte en la delineación del modelo geológico a escala regional.

Como puede apreciarse en la Fig. 6 existe un modelo geológico regional fruto de la integración de datos sísmicos, bioestratigrafía, pozos, coronas, cortes delgados de recortes de

perforación, circones detríticos y afloramientos. La descomposición espectral aportó datos de geometrías, distribución espacial, orientación y dimensiones de geocuerpos mapeados, los cuales ayudaron al entendimiento y comprensión de los diferentes ambientes.

El flujo de trabajo propuesto se aplicó en 12 (doce) *surveys* 3D registrados con diferentes parámetros de adquisición y procesamiento, cobertura, relación señal ruido, calidad del dato, etc., cubriendo aproximadamente 5000 km² de extensión. Se visualizaron alrededor de 200 geocuerpos, los cuales fueron interpretados y extraídos volumétricamente, e insertados en el modelo geológico para el Grupo Cuyo, abarcando diversos ambientes sedimentarios, desde abanicos submarinos de fondo de cuenca, sistemas de canales de talud y paleo valles en la plataforma vinculados a aquellos (Brinkworth *et al.*, 2017) (la Fig. 7, indica los geocuerpos interpretados y la ubicación de los ejemplos analizados en este trabajo).

En muchas oportunidades, para el mismo volumen sísmico a igual profundidad (tiempo), fue necesario utilizar rangos de frecuencias diferentes para obtener los detalles geológicos deseados.

Para el caso de estudio del Grupo Cuyo, las bandas de frecuencia utilizadas a escala regional fueron diversas, entre 23 y 50 Hz (con un máximo de 58 Hz) dados los diferentes volúmenes sísmicos analizados con parámetros de adquisición y procesamiento variables y diferentes profundidades.

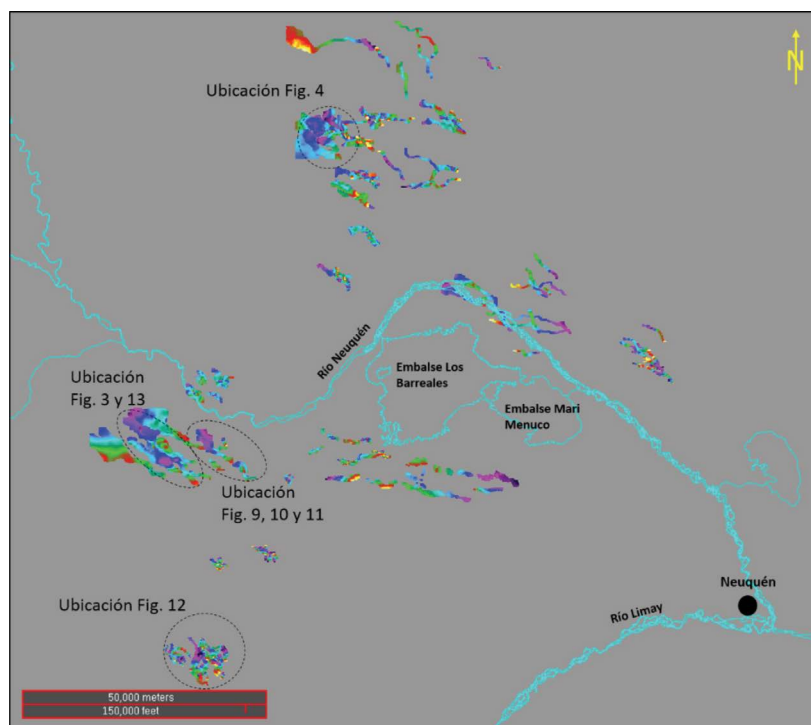


Figura 7. Ubicación de los geocuerpos identificados.

La Fig. 8 muestra los espectros de frecuencia en la zona de interés (Gr. Cuyo) para cada uno de los ejemplos mencionados (ver Fig. 7 para su ubicación), siendo la Fig. 8A el espectro de frecuencia en la zona de interés ejemplificado en la Fig. 4; la Fig. 8B el correspondiente a los ejemplos de las Fig. 3 y 13; la Fig. 8C se corresponde con las Fig. 9, 10 y 11; y la Fig. 8D con el ejemplo de la Fig. 12.

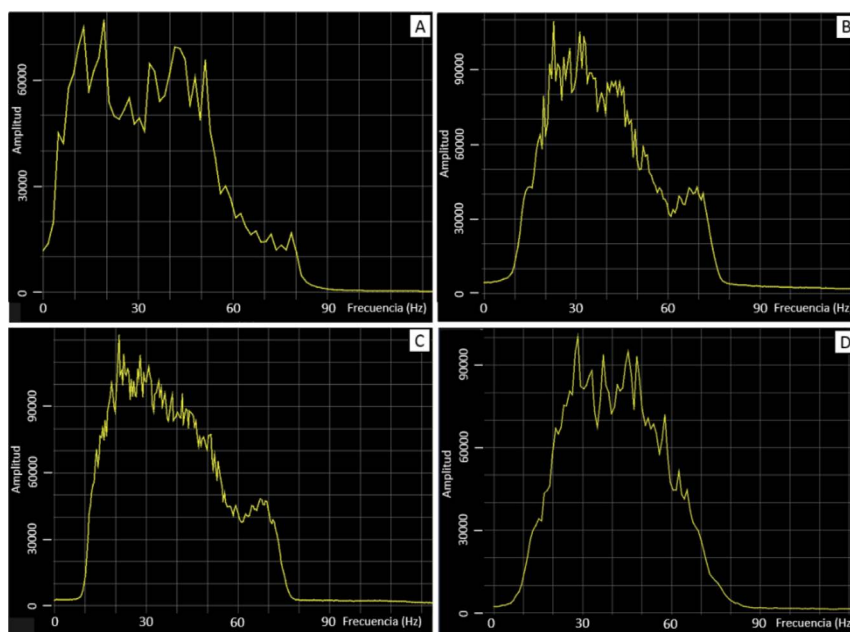


Figura 8. Espectros de frecuencias de las zonas analizadas. A: espectro de frecuencia correspondiente del sector analizado en la Fig. 4; B: ídem para Fig. 3 y 13; C: ídem para Fig. 9, 10 y 11 y D: ídem para Fig. 12.

La información obtenida a partir de la geomorfología sísmica para cada geocuerpo (geometría, dimensión, orientación espacial, etc.) se integró con la interpretación cronoestratigráfica para delinear el modelo geológico del Grupo Cuyo a escala regional.

Se incluyen ejemplos asociados a los diversos ambientes deposicionales analizados.

Rasgos erosivos

Los rasgos erosivos pueden visualizarse con ciertas características en amplitud, tanto en sección como en su correspondiente Horizon Slice (Figs. 9A y 9B respectivamente), indicando la presencia de un posible geocuerpo.

Sin embargo, al implementar la descomposición espectral volumétrica mediante el flujo de trabajo propuesto, los geocuerpos se delimitan de manera más nítida, como se muestra en las Fig. 10A y 10B que corresponden al mismo *Horizon Slice* de la Fig. 9B, pero en este caso en el volumen *Blend* RGB de descomposición espectral con dos posibles combinaciones de frecuencias (baja, media y alta).

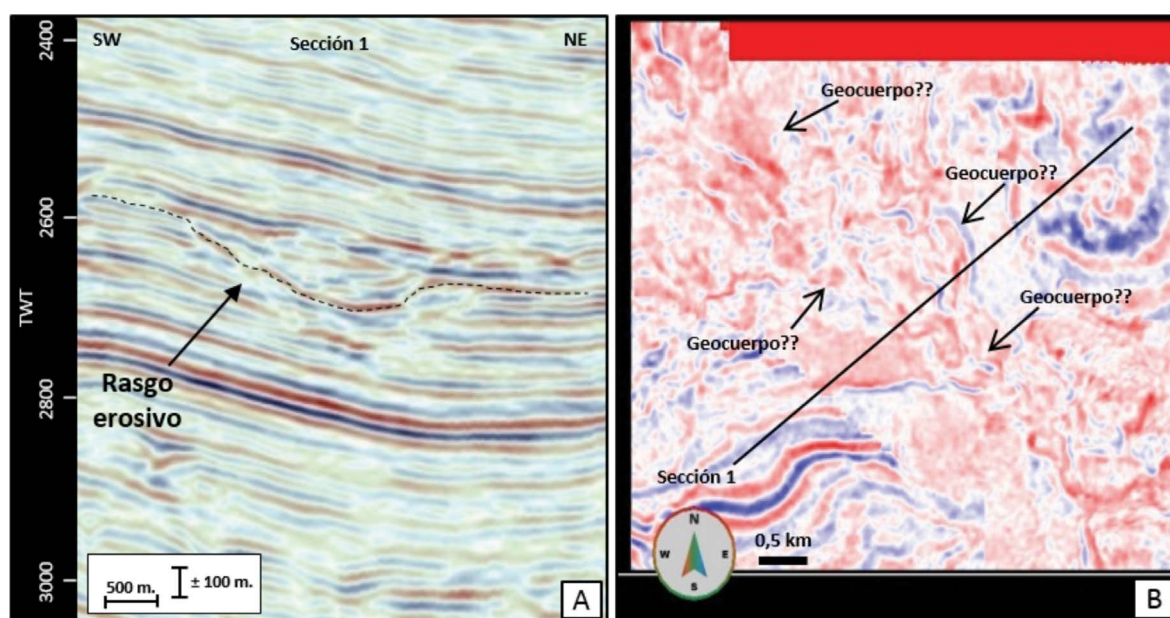


Figura 9. Ejemplos de geocuerpos para rasgos erosivos. A: Identificación del rasgo en la sección sísmica de amplitud. B: Horizon Slice en amplitud mostrando geocuerpos. NOTA: solo en el sector del geocuerpo se interpretó el horizonte, por lo tanto, únicamente este sector está flatenizado, el sector inferior izquierdo y superior derecho no se encuentran flatenizados.

En consecuencia, la extracción e interpretación volumétrica semiautomática de geocuerpos será más efectiva utilizando el *Blend RGB* (Fig. 11A) en lugar del volumen de amplitud (Fig. 9B), para posteriormente convertirlos en horizontes, llevarlos a su posición original e incluirlos en el modelo geológico. La Figura 11B muestra la sección sísmica con los geocuerpos interpretados volumétricamente mediante el *Blend RGB*.

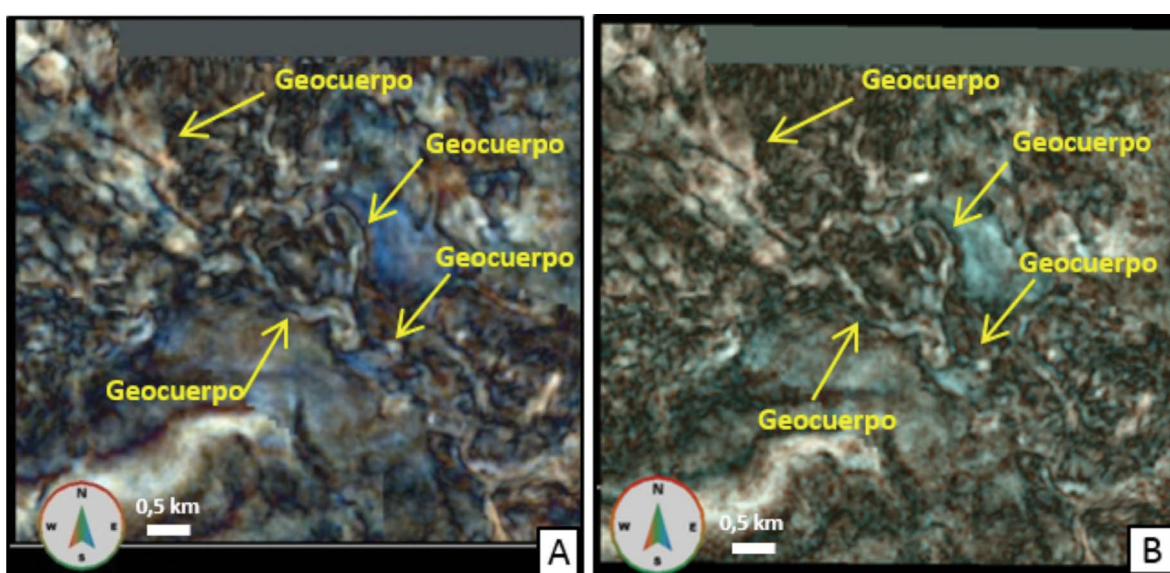


Figura 10. Ejemplos de geocuerpos para rasgos erosivos. C y D: geocuerpos usando dos Blend RGB alternativos utilizando las frecuencias de 34, 42, 54 Hz y 30, 41, 50 Hz respectivamente.

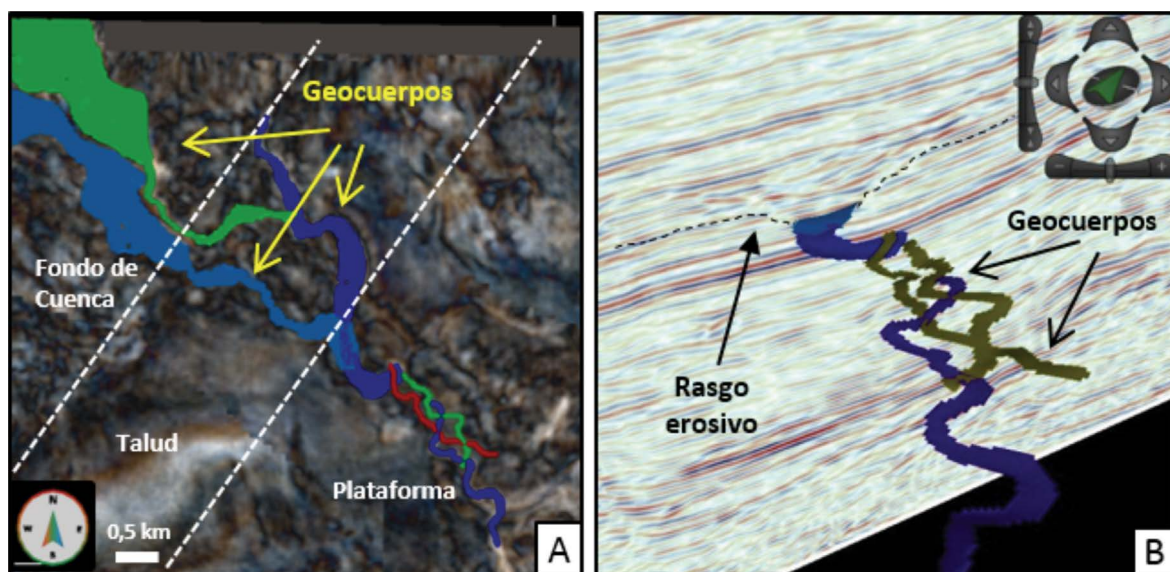


Figura 11. Ejemplos de geocuerpos para rasgos erosivos. A: geocuerpos interpretados en Blend RGB de la Figura 10A. B: Inserción de los geocuerpos extraídos volumétricamente en el volumen de amplitud para su análisis.

Los geocuerpos extraídos (Fig. 11B) coinciden con la base del rasgo observado en amplitud (Fig. 9A), que corresponden acanales que fluyeron a través de un cañón labrado en el talud.

Anomalías de amplitud

De la misma manera, las anomalías de amplitud pueden observarse en el dato sísmico, tanto en sección (Fig. 12A) como en *Horizon Slice* (Fig. 12B), indicando rasgos geológicos que se asemejan a geocuerpos. Luego de realizar la descomposición espectral volumétrica siguiendo las etapas descritas anteriormente, los rasgos geológicos de los geocuerpos se aprecian con mayor claridad y nitidez para el mismo *Horizon Slice* sobre el *Blend RGB* (Fig. 12C).

Los geocuerpos fueron interpretados y extraídos volumétricamente del atributo *Blend RGB* de frecuencias e insertados en su posición original en el modelo geológico (Fig. 12D), donde se aprecian los canales interpretados, concordantes con las anomalías de amplitud visualizadas (Fig. 12A).

La Figura 13A muestra un ejemplo de anomalía de amplitud observada en el área de fondo de cuenca. Luego de completar el flujo de trabajo propuesto y analizar el *Blend RGB* de descomposición espectral con frecuencias óptimas, se detectan dos abanicos submarinos (Figs. 13B y 13C), que se incluyen en el modelo geológico (Fig. 13D).

CONCLUSIONES

La geomorfología sísmica mediante el uso de la descomposición espectral volumétrica permite identificar características sutiles no discernibles con las técnicas de interpretación tradicionales

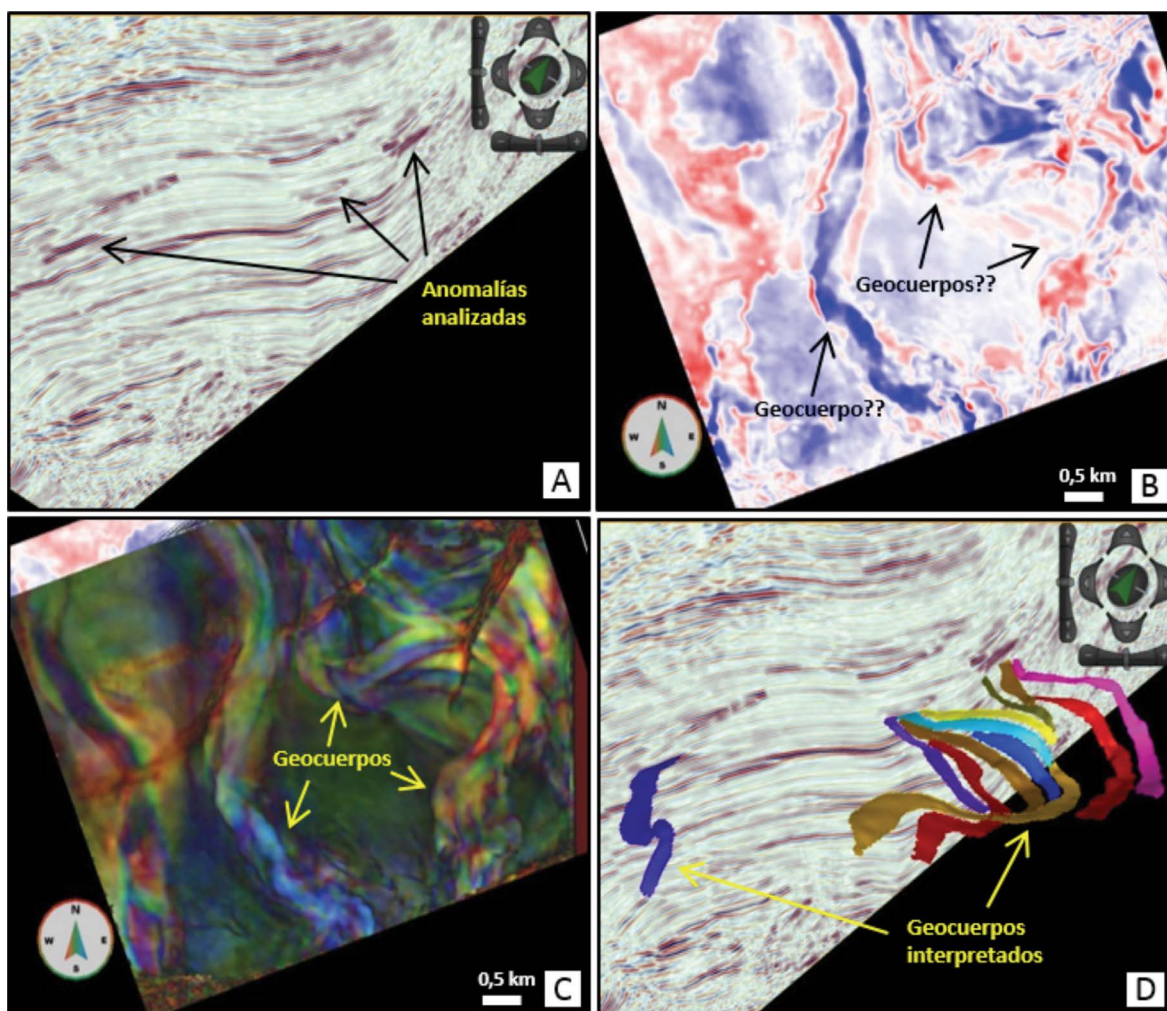


Figura 12. Ejemplos de geocuerpos para anomalías de amplitud. A: Anomalías de amplitud observadas en sección. B: Horizon Slice en el volumen de amplitud. C: Mismo Horizon Slice de la Figura 12B en el Blend RGB elaborado con frecuencias de 19, 31, 58 Hz. D: Inserción de geocuerpos interpretados en el volumen de amplitud. Se observan la concordancia de los geocuerpos con las anomalías de amplitud de la sección A.

(*Horizon Slices* en amplitud, extracción de amplitud RMS, etc.) además de incrementar el detalle de rasgos previamente identificados en amplitud.

Es importante tener presente que para un mismo volumen sísmico y a igual profundidad (tiempo) es posible identificar diferentes geocuerpos variando los valores de frecuencias simplemente por las variaciones litológicas y dimensiones de los cuerpos que se intenta detectar.

La posibilidad y calidad de los objetos geológicos a identificar es función directa de la calidad del dato sísmico y de la presencia de estructuras y/o discontinuidades (ejemplo zonas de fallas), como así también de la calidad de la interpretación del horizonte de referencia para efectuar la horizontalización para la descomposición espectral.

En unidades donde los cambios de espesores de las capas son variables, es necesario contar con varios horizontes de alta calidad de interpretación enfocados a la zona a investigar, para aplicar el flujo de trabajo propuesto con éxito.

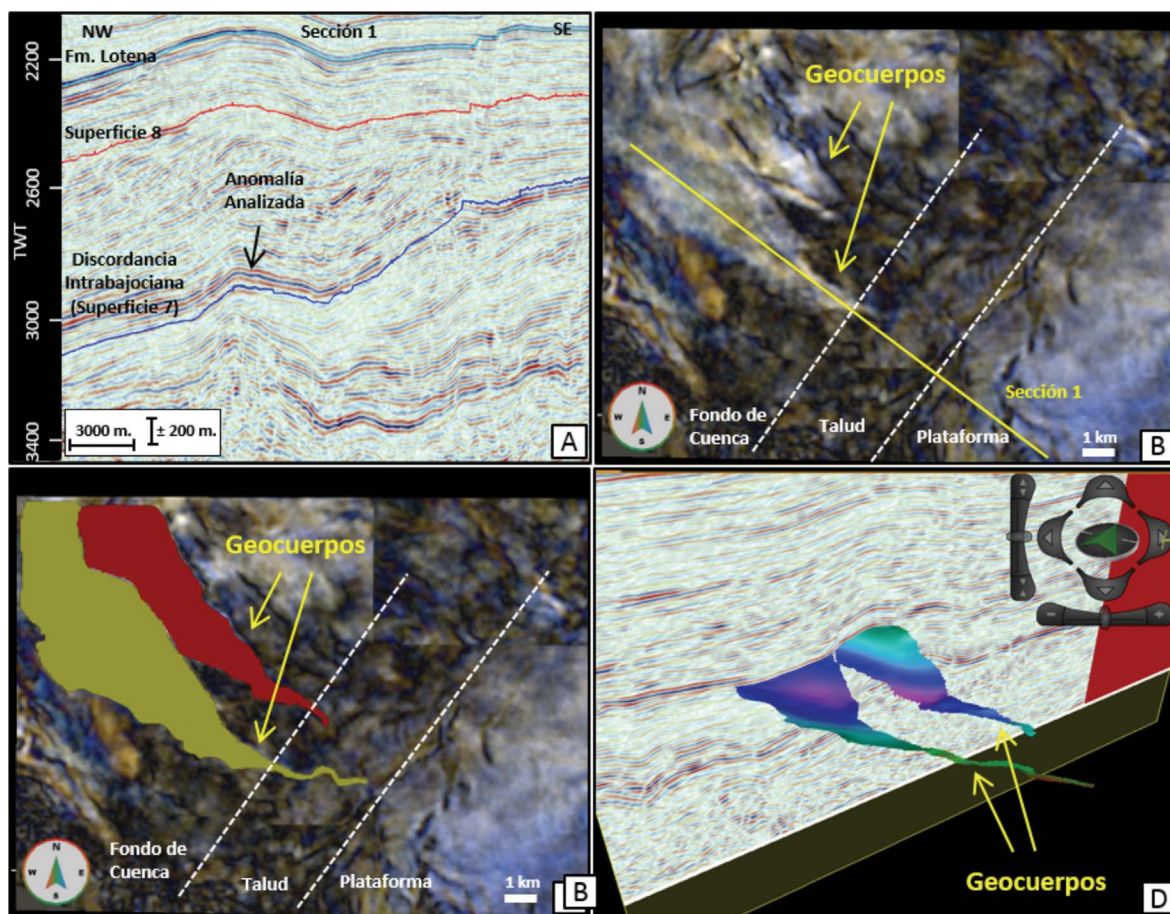


Figura 13. (A) Anomalías de amplitud observadas en sección. (B y C) Blend RGB en donde se observan dos abanicos submarinos y (D) inserción de los geocuerpos interpretados en el volumen de amplitud. Blend RGB elaborado con 25, 28, 39 Hz. Superficies 7 y 8 tomadas de Brinkworth *et al.*, 2017.

El control de calidad utilizando el volumen sísmico original para restaurar los geocuerpos mapeados debe llevarse a cabo como un paso crítico para verificar que los mismos sean efectivamente de origen geológico, comprobando que no atraviesen líneas tiempo.

En el presente trabajo, se propone y aplica una metodología que demuestra el valor agregado del método de descomposición espectral volumétrica *Blend* RGB para ayudar al entendimiento del modelo geológico y comprender el modelo sedimentario, por ejemplo, los radios de meandro, ancho de canales, geometría de los abanicos submarinos, información de importante valor al momento de delinear futuras áreas de prospección de hidrocarburos a escala regional y de desarrollo. Estos ejemplos descriptos muestran la posibilidad de extraer información valiosa para niveles profundos y con escasos datos de pozos dentro del Grupo Cuyo, donde no abundan trabajos con la aplicación de este atributo.

REFERENCIAS CITADAS

- Arregui, C., Carbone, O. Martínez R. 2011. El Grupo Cuyo (Jurásico Temprano-Medio) en la Cuenca Neuquina. En: Actas del XVIII Congreso Geológico Argentino (Eds. Leanza, Franchini, Impiccini, Pettinari, Sigismondi, Pons y Tunik), p. 77. Neuquén, Argentina.
- Brinkworth, W. Vocaturro, G., Loss, M., Giunta, D., Mortaloni, M., Massaferrro J. 2017. Integración Regional de Subsuelo Orientado a la Exploración y Desarrollo del Grupo Cuyo, Cuenca Neuquina. XX Congreso Geológico Argentino Simposio 4, 18-23.
- Chopra, S., Marfurt, K. 2007. Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization. Geophysical Developments N°11.
- Dellape, D.A., Mombru, C., Pando, G.A., Riccardi, A.C., Uliana, M.A., y Westermann, G.E.G., 1979. Edad y correlación de la formación Tábanos en Chacay Melehue y otras localidades de Neuquén y Mendoza. Con consideración sobre la distribución y significado. Obra del Centenario del Museo de la Plata V:81-105.
- Hall M., Trouillot, E. 2004. Predicting stratigraphy with spectral decomposition. Canadian Society of Exploration Geophysics, Expanded Abstracts.
- Legarreta, L. y Gulisano, C., 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico superior – Terciario inferior), Argentina. En Chelbi, G. A. y L.A. Spalletti (Eds.): Cuencas Sedimentarias Argentinas. Serie Correlación Geológica, 6:221-243. San Miguel de Tucumán.
- Loss, M., Brinkworth, W., Vocaturro, G., Sanchez, D., Mortaloni, E., Olariu, C. y Steel, R., 2018. Shelf edge deltas, canyon systems and turbidites in the cuyo group: plays definition from regional seismic stratigraphic interpretation with support of analogous outcrops. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mendoza, 2018. En prensa.
- Posamentier, H., Davies, R, Cartwright, J., Wood, L. 2007. Seismic Geomorphology – An Overview. Seismic Geomorphology: Applications to Hydrocarbon Exploration and Production. Geological Society, London, Special Publications, 277, 1-14.