



FaIn·UNCo
Facultad de Ingeniería

TRABAJO FINAL DE LICENCIATURA EN CIENCIAS
GEOLÓGICAS

**Interpretación sísmica del basamento
de la Cuenca Neuquina
en el bloque sísmico 3D Ojo de Agua**

Autor: Salvo Alexander Alexis

DNI: 37663144

Legajo: ING-3429

Directora: Lic. Iglesias Sheyla Elían

Co-director: Lic. Mendiberri Juan

Neuquén, febrero, 2024

1. RESUMEN

El presente trabajo se centraliza en la interpretación del basamento (depósitos asociados a la etapa de pre-rift) de la Cuenca Neuquina en el volumen sísmico 3D Ojo de Agua situado en el sector sur de la cuenca, a partir de la interpretación de los datos de pozos y datos sísmicos. El área se ubica hacia el sur de la Dorsal de Huincul. Para la elaboración de dicho estudio se realizó una selección de los pozos con mejor información para ser correlacionados con los datos sísmicos. Se interpretaron los principales reflectores sísmicos de interés en la zona, fallas, rasgos estratigráficos y estructurales. Luego se confeccionaron mapas isócronos de los horizontes interpretados para comprender las estructuras presentes y mapas isocronopáquicos entre horizontes interpretados. Además, se calcularon atributos de amplitud y de discontinuidad para lograr una mejor comprensión de la evolución estructural y sedimentaria.

Se interpretaron tres grandes familias de fallas, todas ellas de comportamiento normal asociadas a la etapa de rifting de la cuenca, las cuales originaron depocentros con geometría de hemigrábenes limitados por grandes pilares tectónicos o horst. Se introduce además un pequeño análisis de los principales reservorios a tener en cuenta para futuras prospecciones hidrocarburíferas.

Palabras claves: Cuenca Neuquina, Ojo de Agua 3D, interpretación sísmica, basamento.

2. ABSTRACT

This paper focuses on the interpretation of the Neuquén Basin basement (underlying units at Precuyo in this study) in the Ojo de Agua 3D seismic cube located in the southern sector of the basin, based on the interpretation of well and seismic data. The area is located at the south of the Huincul Ridge. For the elaboration of this study, a selection of the wells was carried out with better information to be correlated with the seismic data. The main seismic reflectors of interest in the area, faults and stratigraphic and structural features were interpreted. Times structures maps of the interpreted horizons were made to understand the present and isochronopachic maps between interpreted horizons. In addition, amplitude and discontinuity attributes were calculated to gain a better understanding of the structural and sedimentary evolution.

Three large families of faults were interpreted, all of them with normal behavior originating during the rifting stage of the basin, which originated depocenters with hemigraben geometry limited by large tectonic pillars or horst. A small analysis of the main reservoirs to be taken into account for future hydrocarbon prospecting is also introduced.

Keywords: Neuquén Basin, Ojo de Agua 3D, seismic interpretation, basement.

3. AGRADECIMIENTOS

- A mi directora Sheyla Iglesias y co-director Juan Mendiberri por su compromiso desde el comienzo de este trabajo, siempre dispuestos a ayudarme, orientarme y brindarme de su tiempo en todo momento. Gracias por su calidad profesional y humana.
- A todos los profesores que tuve el privilegio de conocer a lo largo de la carrera. Gracias por compartir su pasión por algo tan lindo como la geología. A los que están y a los que no, muchas gracias por todo.
- Al jurado evaluador, Mirta Suarez, Emiliano Santiago y Martín Turienzo por aceptar corregir mi trabajo final.
- A la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia de Neuquén, quien brindó los datos para la elaboración de este trabajo final.
- A mi madre Isabel Salvo y a mi compañera de vida Victoria Hernández. Gracias por ser mi sostén y guía durante todos estos años. Todo esto es gracias a ustedes.
- A mis compañeros y amigos de la facultad, sin dudas este viaje no podría haber sido tan gratificante sin su compañía. Mención especial para mi amigo, Santiago Mesonero, con quien compartí incontables horas de estudio, charlas, salidas de campo y esos instantes de nerviosismo antes de rendir. La geología es mejor si se comparte con amigos.
- A mi amigo, Sergio Espinoza, quien ha sido un eslabón muy importante en lo personal y profesional. Gracias por cada palabra.
- Y un agradecimiento muy especial a mis hijos perrunos, Max, Zika, Canela y Zeus, quienes siempre estuvieron para sacarme una sonrisa cuando los días no eran tan amenos.

*“El progreso no se alcanza por suerte o accidente
sino trabajando en ti mismo diariamente”*

Epicteto

CONTENIDO

1. RESUMEN	2
2. ABSTRACT	3
3. AGRADECIMIENTOS	3
4. INTRODUCCIÓN	7
4.1. Objetivos.....	7
4.2. Objetivos específicos.....	7
4.3. Ubicación del área de estudio.....	7
4.4. Factibilidad.....	8
4.5. Antecedentes.....	8
5. MARCO GEOLÓGICO	9
5.1. Cuenca Neuquina.....	9
5.1.1. Evolución geodinámica.....	10
5.1.2. Regiones morfoestructurales.....	14
5.2. Ámbito estructural en el área de estudio.....	15
5.2.1. Dorsal de Huincul.....	15
5.2.2. Depocentro Picún Leufú.....	18
5.3. Elementos del sistema petrolero en el área de estudio.....	22
5.3.1. Rocas generadoras.....	24
5.3.2. Reservorios.....	26
5.3.3. Estilos de entrapamiento.....	28
5.3.4. Vías de migración.....	28
5.3.5. Sellos.....	29
6. MARCO TEÓRICO	30
6.1. Adquisición del dato sísmico.....	30
6.1.1. Adquisición sísmica en el área de estudio.....	32
6.2. Procesamiento de datos sísmicos.....	37
6.2.1. Procesamiento del dato sísmico en el área de estudio.....	39
6.3. Interpretación del dato sísmico.....	39
6.3.1. Calibración sísmica-pozo.....	39
6.3.2. Resolución sísmica.....	43
6.3.3. Atributos sísmicos.....	44
6.4. Registros de pozos.....	46
7. DESARROLLO	47
7.1. Metodología.....	47
7.2. Carga de datos en software OpendTect.....	48
7.3. Correlación sísmica-pozo y análisis de fase.....	50
7.4. Cálculo de resolución sísmica.....	53
7.5. Interpretación.....	55
7.5.1. Interpretación de reflectores sísmicos.....	55
7.5.2. Interpretación de fallas y discontinuidades.....	58
8. RESULTADOS	63
8.1. Elaboración y análisis de mapas.....	63
8.2. Rasgos estratigráficos y estructurales asociados al basamento.....	78
8.3. Identificación de zonas de interés para futuras perforaciones exploratorias.....	82
8.4. Modelo geológico.....	89
9. CONCLUSIONES	91
10. BIBLIOGRAFÍA	93
11. ANEXOS	102

4. INTRODUCCIÓN

4.1. Objetivos

El presente trabajo tiene por objetivo la interpretación y descripción del basamento sísmico de la Cuenca Neuquina en el bloque Ojo de Agua a través de la integración de datos sísmicos en tres dimensiones y datos de pozos.

4.2 Objetivos específicos

- Describir y analizar el contexto estructural del área de estudio en el ámbito de la Cuenca Neuquina.
- Definir, a través del dato sísmico, el basamento de la Cuenca Neuquina en el área de estudio.
- Correlacionar el dato sísmico con las perforaciones existentes en el área de estudio. Correlación tiempo / profundidad.
- Identificar, definir e interpretar el contacto entre el basamento y las secuencias sedimentarias suprayacentes.
- Interpretar rasgos estratigráficos asociados al basamento.
- Interpretar rasgos estructurales vinculados al basamento que puedan generar trampas hidrocarburíferas de interés económico.
- Definir zonas de interés para futuras perforaciones exploratorias convencionales y/o no convencionales.

4.3 Ubicación del área de estudio

El estudio se desarrolló en los límites del volumen sísmico 3D Ojo de Agua. Se ubica a 56,5 km hacia el suroeste de la localidad de Neuquén, siendo su límite este el Embalse Arroyito (Fig. 1). Se encuentra conformada por los sectores orientales de las concesiones hidrocarburíferas de Al Sur de la Dorsal y Dos Hermanas, sector sur de Aguada Pavón y Senillosa, sureste de El Porvenir y La Vía I. Completan el volumen sísmico las concesiones de Ojo de Agua y el extremo noroccidental de Borde del Limay, abarcando un área de 243 km² (Fig. 1).

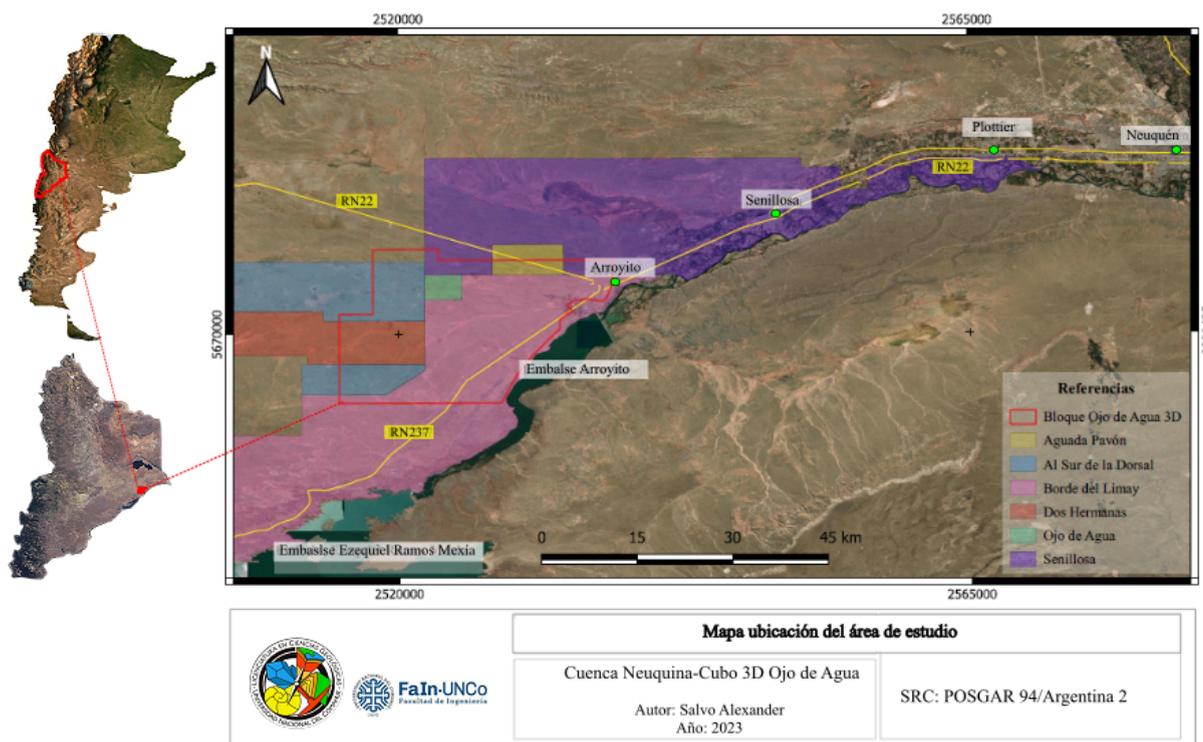


Figura 1. Imagen satelital de la porción oriental de la provincia de Neuquén con las localidades adyacentes al área de estudio y las concesiones hidrocarburíferas que constituyen el volumen sísmico 3D Ojo de Agua. En color rojo se señala el área de estudio (cubo 3D Ojo de Agua).

4.4 Factibilidad

El acceso a la información para el desarrollo de este trabajo, se logró mediante el convenio existente entre la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén y la Universidad Nacional del Comahue, facilitando el dato sísmico 3D del proyecto Ojo de Agua de la Provincia del Neuquén, además de los legajos, informes de recortes de perforación y perfiles eléctricos de pozos hidrocarburíferos desarrollados en el área de estudio. Para el análisis de los datos sísmicos se utilizó el software *Opendtect* de uso libre. Por otra parte, la elaboración de mapas isocronopáquicos (espesores en tiempo) e isócronos (tiempo) de los reflectores de interés se llevó a cabo mediante el uso del software libre del sistema de información geográfica QGIS.

4.5 Antecedentes

Los primeros datos del basamento de la Cuenca Neuquina al sur de la Dorsal de Huincul fueron obtenidos a través de un análisis detallado de superficie en la porción noroeste del Macizo Nordpatagónico. Cucchi *et al.*, (1998) mencionan en la Hoja Geológica de Piedra del Águila afloramientos del basamento al suroeste de la zona de estudio. En este sentido, Volkheimer (1964) definió a un conjunto de rocas metamórficas de bajo grado como Fm. Cushamen, mientras que Nullo (1979) propuso la denominación de Fm. Mamil Choique a una serie de rocas ígneas y metamórficas, las cuales conforman en conjunto con la Fm. Cushamen el basamento cristalino de la cuenca en estas latitudes.

En base a la información otorgada por la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén, las primeras perforaciones en el proyecto Ojo de Agua 3D

comenzaron en el año 1957 a cargo de la compañía YPF S.A., con el pozo exploratorio NQ.x-31 el cual alcanzó una profundidad de 1274 metros bajo boca de pozo (mbbp). En el desarrollo del mismo, se obtuvieron rastros y producción de petróleo en los niveles *Zona de Relleno y Serie Challacó*. Actualmente, la denominada *Zona de Relleno* es conocida como Fm.Tordillo, Sierras Blancas o Quebrada del Sapo (Digregorio 1972; Stipanivic *et al.*, 1966; entre otros) mientras que la *Serie Challacó* hoy en día es conocida como Fm. Challacó (de Ferrariis, 1947). En el año 1958 comenzaron las labores exploratorias correspondientes al pozo NQ. a-33 con una profundidad final de 1220 mbbp alcanzando el tope de la denominada, en aquel entonces *Serie Challacó*. El mismo resultó productivo hallando hidrocarburos en las secciones medias y superiores de los niveles *Zona de Relleno y Challacó*. Un año más tarde, se perforaron los pozos NQ.a-39 y NQ.a-41, alcanzando profundidades de 1240,3 y 1223 mbbp respectivamente, productivos en los niveles permeables del nivel correspondiente a la *Zona de Relleno*. En el año 2001, la operadora *Pioneer Natural Resources* comenzó con los trabajos de exploración en el yacimiento Divisadero General San Martín. Parte de este yacimiento se encuentra en el extremo noroeste del área de estudio. Su desarrollo comenzó con la perforación del pozo NQ.a-1020 alcanzando 1600 mbbp teniendo resultados satisfactorios en las Fms. Quintuco, Vaca Muerta, Quebrada del Sapo y Grupo (Gr.) Cuyo. Un año más tarde, se realizó la perforación del pozo NQ.a-1021 con una profundidad final de 1602 mbbp alcanzando las unidades del Precuyo. El mismo resultó productivo en los niveles permeables de la Fm. Quebrada del Sapo. Durante el 2003, se realizó la perforación del pozo NQ-1034, alcanzando la profundidad final de 1300 mbbp resultando de interés petrolero las unidades de la Fm. Quebrada del Sapo. Al año siguiente, se llevó a cabo la perforación del pozo NQ-1040 con una profundidad final de 1300 mbbp. Los resultados adquiridos dieron lugar al interés petrolero en las Fms. Quintuco y Quebrada del Sapo. En el año 2013, la operadora Pampa S.A, comenzó la exploración del subsuelo, en el área Aguada de Pavón, perforando a una profundidad final de 1300 mbbp. Los resultados obtenidos arrojaron cierto interés en las Fms. Quintuco, Quebrada del Sapo y Challacó, quedando en producción en los intervalos permeables de la Fm. Quebrada del Sapo.

Por otra parte, los primeros registros del basamento de la Cuenca Neuquina en el zona de estudio fueron obtenidos a partir de las labores de perforación realizadas por la compañía YPF S.A entre los años 1959 y 1960 en el sector de puesto Mellao con el pozo denominado Me.x-1 y en 1985 con el pozo Me.x-2 alcanzando las profundidades de 1999,20 mbbp y 1900 m.b.b.p respectivamente. Ninguno de los pozos mencionados registraron evidencias de hidrocarburos con lo cual se procedió al abandono por improductividad.

5. MARCO GEOLÓGICO

5.1 Cuenca Neuquina

La Cuenca Neuquina se localiza en el centro oeste de la República Argentina. Es una cuenca con características de retroarco - antepaís, la cual se desarrolla en la provincia del Neuquén, el sector occidental de las provincias de Río Negro y La Pampa y la porción suroccidental de la provincia de Mendoza (Fig. 2). Aproximadamente, cubre una región de 115.000 km² donde logró acumular más de 6.000 m de espesor de secuencias volcánicas y sedimentarias marinas y continentales (Howell *et al.*, 2005).



Figura 2. Ubicación de la Cuenca Neuquina (extraído de Otharán, 2020).

5.1.1 Evolución geodinámica

A lo largo de la historia geológica de la Cuenca Neuquina, se pueden reconocer cuatro estadios principales que ejercieron un fuerte control en la evolución del relleno sedimentario (Legarreta y Gulisano, 1989):

Etapa de *pre-rift* (Silúrico-Pérmico)

La Cuenca Neuquina se desarrolló sobre un basamento ígneo-metamórfico de edad silúrica-pérmica (Llambías y Sato, 2011). Sigismondi *et al.*, (2011) proponen definirlo utilizando consideraciones geológicas, magnéticas, gravimétricas y acústicas. El basamento geológico fue definido como una unidad litoestratigráfica constituida por rocas metamórficas y cuerpos ígneos. Utilizando los términos geofísicos, el basamento “magnético” se define por rocas con mayor susceptibilidad magnética, la cual refleja la abundancia, naturaleza (magnetita-silicatos) y composición química (relación hierro-magnesio) de las fases minerales constituyentes en comparación con las unidades sedimentarias suprayacentes. El basamento “acústico” corresponde a la interfase que representa el contraste de impedancias acústicas más profundas y continuas.

A través de estudios de superficie, Leanza *et al.*, (1997) definieron como parte del basamento cristalino a un conjunto de rocas ígneas y metamórficas paleozoicas (Complejo Plutónico del Chachil) dentro de la comarca de Chachil. Sin embargo, la presencia de rocas

graníticas en la comarca ya había sido referida anteriormente por Groeber (1918); Groeber (1929); Lambert (1946) y Lambert (1948) entre otros autores, bajo la denominación de “Basamento Cristalino”. Leanza *et al.*, (1997) describieron afloramientos del basamento en el área de Picún Leufú como Complejo Plutónico del Chachil (CPCh), el cual aflora en concomitancia a la cumbre del cerro Trapial Mahuida y en el cerro Granito con una edad Ar/Ar de $298 \pm 1,3$ Ma (Pérmico Inferior) en hornblenda (Gregori *et al.*, 2011).

Al norte de la provincia del Neuquén, el basamento está compuesto por metamorfitas de bajo grado de la Fm. Piedra Santa de edad silúrica-devónica (Zanettini *et al.*, 2010 y Cingolani *et al.*, 2011) y por el Gr. Andacollo (Fms. Arroyo del Torreón y Huaraco) (Digregorio, 1972; Llambías *et al.*, 2007 y Danieli *et al.*, 2011). La Fm. Arroyo del Torreón se caracteriza por tobos, ignimbritas y flujos lávicos y domos de riolita-dacita, intercalados con conglomerados, areniscas y lutitas negras, de forma similar a la Fm. Huaraco suprayacente (Giacosa *et al.*, 2014). Suárez *et al.*, (2008) asignaron una edad de $327,9 \pm 2,0$ Ma para la Fm. Arroyo del Torreón a través de dataciones en circones de domos riolíticos. Por otra parte, las riolitas interdigitadas ubicadas en la parte superior de la formación fueron datadas por Hervé *et al.*, (2013) con una edad de 326 ± 3 Ma (U-Pb SHRIMP). Los fósiles marinos y restos de plantas presentes en la Fm. Huaraco, permitieron adjudicar esta unidad al Carbonífero superior (Llambías *et al.*, 2007).

El Complejo Plutónico Huigancó (CPG) (Digregorio, 1972) al norte de la provincia de Neuquén, se encuentra integrado por tres facies (Llambías *et al.*, 2007 y Sato *et al.*, 2008). Facies de granodiorita con edades reportadas entre 289 ± 1 Ma (U-Pb convencional en circones, Sato *et al.*, 2008) y $282,5 \pm 2,0$ Ma (U-Pb SHRIMP, Hervé *et al.*, 2013). Una segunda facies de monzogranito con una edad de 259 ± 9 Ma (U-Pb convencional en circones, Sato *et al.*, 2008) y domos subvolcánicos riolíticos pequeños que intruyen a las rocas del Grupo Andacollo, pero sin evidencias de relación con las facies monzogranito y/o granodiorita. Estas unidades del CPG serían correlacionables con el Grupo Choiyoi (Kay *et al.*, 1989; Rolleri y Criado Roqué, 1970; Varela *et al.*, 2005 y Llambías y Sato, 2011).

Etapa de *syn-rift* (Triásico Superior a Jurásico Inferior)

Los primeros indicios del relleno de la cuenca se desarrollaron en una etapa de *rifting* (Triásico Superior a Jurásico Inferior) donde se originaron depocentros aislados y desconectados entre sí, relacionados a grábenes, hemigrábenes y zonas de transferencia (Mendiberri y Carbone, 2002). Éstos fueron desarrollados sobre depósitos neopaleozoicos y rocas permotriásicas que posteriormente fueron cubiertos y rellenos por depósitos volcanoclásticos y epiclásticos denominados informalmente como Precuyano que se extiende hasta el Jurásico Inferior (Gulisano *et al.*, 1984). Por su parte, Franzese *et al.*, (2006) describen tres etapas en el relleno de *syn-rift*, una etapa inicial definida por la interacción entre el vulcanismo bimodal y la sedimentación impulsada por la gravedad. La etapa media, con una transición al magmatismo ácido (flujos riolíticos y piroclásticos), también asociado con deposiciones no marinas de grano grueso y la etapa tardía, dominada por turbiditas de grano fino y caídas piroclásticas relacionadas con la primera sedimentación marina en la Cuenca Neuquina, lo cual coincidiría parcialmente con las tres Unidades Tectono-Sedimentarias definidas por D'Elía *et al.*, (2015).

Etapa de *post-rift* (Jurásico Inferior a Cretácico Inferior)

Durante el Jurásico Inferior al Cretácico Inferior, se instauró un arco volcánico en el borde occidental de Gondwana (Kay *et al.*, 1989; Franzese *et al.*, 2003). La Cuenca Neuquina comenzó a desarrollarse como una cuenca de retroarco extendiéndose como tal hasta el Cretácico Inferior. Durante este período la sedimentación comenzó a ser dominada por subsidencia térmica (Turic *et al.*, 1987; Spalletti *et al.*, 2000; Macdonald *et al.*, 2003; Howell *et al.*, 2005). Las primeras transgresiones marinas desde el océano Pacífico produjeron la depositación de la Fm. Los Molles, definida por Weaver (1931) y descrita por diversos autores (Dellapé *et al.*, 1979, Riccardi 1993; Larriestra *et al.*, 2018), la cual subyace a la Fm. Lajas (Weaver, 1931) caracterizada por importantes aportes clásticos desde el sur y sudeste (Leanza *et al.*, 1997; Arregui *et al.*, 2011). La retracción definitiva culminó en el Jurásico Medio alto con la depositación de las areniscas continentales de la Fm. Challacó (de Ferrariis, 1947; Leanza, 2009, entre otros) y los niveles evaporíticos de la Fm. Tábanos (Stipanovic, 1966; Arregui *et al.*, 2011).

Durante el Jurásico Medio y Jurásico Superior, numerosos ciclos regresivos-transgresivos del mar Pacífico originaron la depositación de secuencias clásticas, carbonáticas y evaporíticas del Gr. Lotena integrado por las Fms. Lotena (Weaver, 1931; Leanza *et al.*, 1997; Leanza, 2009), La Manga (Stipanovic, 1966) y las evaporitas de la Fm. Auquilco (Leanza *et al.*, 1997; Arregui *et al.*, 2011). Zavala *et al.*, (2020) mencionan un importante control estructural en la depositación de estas unidades litoestratigráficas, lo cual condujo a una diferencia facial de las mismas tanto al norte como al sur de la Dorsal de Huincul.

La estructuración de la Dorsal de Huincul (Silvestro y Zubiri, 2008; Mosquera, 2008; Pángaro *et al.*, 2009) produjo un importante diastrofismo lo que originó la erosión y sedimentación de un espeso intervalo clástico continental de procedencia aluvial, fluvial y eólico correspondientes a las Fms. Tordillo, Quebrada del Sapo y Sierras Blancas (Digregorio, 1972; Mosquera, 2002; Maretto *et al.*, 2005; Spalletti *et al.*, 2011).

Durante el Tithoniano, el paisaje originado fue inundado por la transgresión marina que generó la secuencia Vaca Muerta-Quintuco caracterizada por una alternancia de lutitas orgánicas y numerosos pulsos progradantes clástico-calcáreos (Olmos *et al.*, 2002; Leanza *et al.*, 2011; Capelli *et al.*, 2018; Otharan, 2020) constituyendo el Gr. Mendoza Inferior (Tithoniano-Valangiano Inferior).

Discordantes a las mismas, yacen las unidades del Gr. Mendoza Superior compuesto por las Fms. Mulichinco y Agrio definidas por Weaver (1931). La Fm. Mulichinco contiene depósitos alternantes entre continentales fluviales, marinos proximales y distales influenciados por la actividad tectónica (Vergani *et al.*, 1995; Schwarz *et al.*, 2006; Schwarz *et al.*, 2011; Pino *et al.*, 2022). Por su parte, la Fm. Agrio definida por Weaver (1931) se encuentra constituida por los miembros (Mbs) Pilmatué (Leanza *et al.*, 2001), Avilé (Weaver, 1931) y Agua de la Mula (Leanza *et al.*, 2001). Los Mbs. Pilmatué y Agua de la Mula presentan sucesiones de lutitas oscuras acumuladas en ambiente marino entre las que intercalan calizas y areniscas (Leanza y Hugo 1997; Aguirre Urreta y Rawson 2001; Sagasti 2002). Por su parte, el Mb. Avilé se encuentra caracterizado por depósitos fluviales, eólicos y lacustres (Veiga *et al.*, 2011).

Durante el Aptiano-Albiano, se desarrolló el Gr. Bajada del Agrio conformado por las Fms. Huitrín (Groeber, 1946) y Rayoso (Herrero Ducloux, 1946). La Formación Huitrín ha sido

dividida en tres Mbs. Troncoso (Inferior y Superior), Troncoso y Salina, los cuales, en conjunto, constituyen una sucesión de areniscas fluviales y eólicas, bancos yesíferos, calizas y dolomías y una alternancias de arcilitas varicolores (Leanza, 2003).

Por otro lado, la Fm. Rayoso, se compone por una sucesión de hasta 1200 m de areniscas finas, pelitas rojas, carbonatos y evaporitas, acumuladas en un medio predominantemente continental, el cual marca la desconexión definitiva de la Cuenca Neuquina con el paleo-océano Pacífico (Zavala y Ponce, 2011; Alonso, 2016).

Etapas de *foreland* (Cretácico Superior-Cenozoico)

La transición a una cuenca de *foreland* comenzó a fines del Cretácico Inferior con la horizontalización de la placa subducida, lo que produjo un régimen tectónico compresivo y la migración del frente orogénico hacia el este (Tunik *et al.*, 2010; Gianni *et al.*, 2018; Muñoz *et al.*, 2018). Esta abrupta modificación es representada por la Discordancia Patagónica del Albiano-Cenomaniano, sobre la cual se depositó el Gr. Neuquén definido por Stipanovic *et al.*, (1968) caracterizado por el amplio desarrollo de depósitos continentales de origen fluvial, principalmente, eólico y lacustre (Garrido, 2011). Las siete formaciones integrantes de este grupo son incluidas en los subgrupos (Sbgrs) Río Limay (Fms. Candeleros y Huincul), Río Neuquén (Fms. Cerro Lisandro, Portezuelo, Los Bastos, Sierra Barrosa y Plottier) y Río Colorado (Fms. Bajo de la Carpa y Anacleto) (Garrido, 2011).

Debido al cambio de la pendiente regional de la cuenca, el Gr. Neuquén fue cubierto por el Gr. Malargüe, definido por Gerth (1925) y Uliana y Dellapé (1981) constituido por depósitos marinos y continentales (Tunik *et al.*, 2010; Musso *et al.*, 2012; Armas y Sánchez, 2013) el cual representa la primera ingesión marina de la Cuenca Neuquina procedente del Atlántico.

La tectónica andina comenzó a manifestarse en el sector occidental de la cuenca entre el Cretácico Superior y Cenozoico, deformando las diferentes sucesiones sedimentarias mediante continuos cambios en el ángulo de la placa subducida y a su vez, controló la posición geográfica del arco volcánico (Folguera *et al.*, 2002; Ramos y Folguera, 2005). Por su parte, el sector oriental funcionó como una zona de acumulación, depositación y tránsito de depósitos del antepaís. Un resumen de las etapas evolutivas de la Cuenca Neuquina se visualiza en la Fig 3.

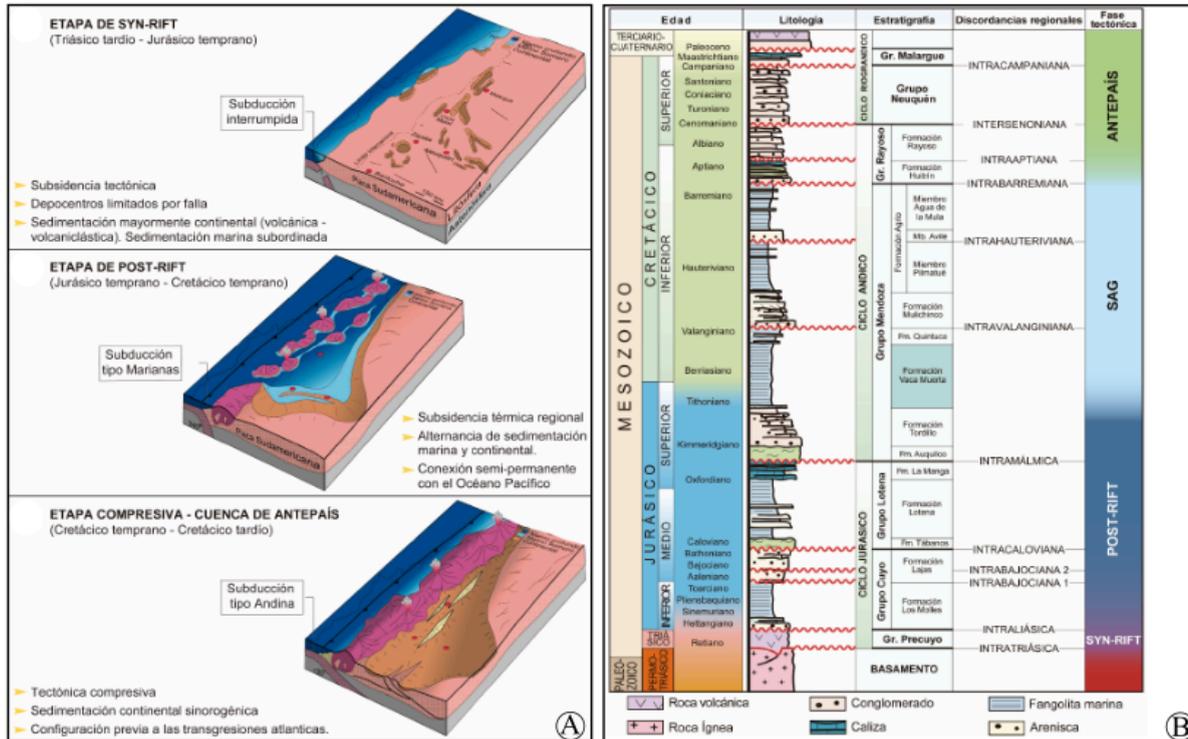


Figura 3. A) Evolución tectosedimentaria de la Cuenca Neuquina (extraído de Otharán, 2020). B) Columna estratigráfica generalizada donde se detallan las unidades litoestratigráficas mencionadas, las principales discordancias y las etapas evolutivas del relleno de la Cuenca Neuquina (extraído de Otharán, 2020).

5.1.2 Regiones morfoestructurales

La provincia de Neuquén fue dividida en tres provincias geológicas: Cordillera Principal, Cordillera Patagónica y Engolfamiento Neuquino según su comportamiento estructural, estratigrafía y geomorfología (Ramos *et al.*, 2011). En la Cuenca Neuquina existe un rasgo de primer orden que la segmenta en dos subcuencas (Engolfamiento Neuquino y Depocentro de Picún Leufú) conocido como Dorsal de Huincul y que correspondería al antiguo límite del continente paleozoico de Patagonia (Ramos *et al.*, 2004) (Fig.4).

al., (1995) y con mayor detalle Vergani *et al.*, (1995), establecieron un modelo de inversión selectiva de hemigrábenes. Silvestro y Subiri (2008) detallaron el modelo de convergencia oblicua el cual permite explicar en un único esquema zonas con desarrollo de fallamiento inverso, aproximadamente perpendicular a la dirección de convergencia, y zonas con estructuras transcurrentes orientadas de forma subparalela a la dirección de convergencia.

La actividad tectónica de la Dorsal de Huincul controló la sedimentación del margen sur de la Cuenca Neuquina durante el Mesozoico y parte del Cenozoico desarrollando estratos de crecimiento y discordancias (Silvestro y Zubiri, 2008).

Su evolución estuvo influenciada por las anisotropías del basamento y la dinámica del margen convergente pacífico. La primera controló fuertemente la orientación y estilos estructurales de la deformación, en tanto que las variaciones en la dinámica del margen convergente definieron la duración de los tres ciclos de deformación de la dorsal (Mosquera *et al.*, 2006).

La etapa Aluk inicial (Toarciano- Valanginiano) según Mosquera *et al.*, (2011), estuvo caracterizada por una deformación producto de un campo de esfuerzos de dirección NO-NNO del vector de esfuerzos principal. El desarrollo de estructuras estuvo controlado por la convergencia oblicua de dos zonas de comportamiento mecánico diferente, el Macizo Nordpatagónico (MNP) como bloque rígido hacia el SE y una corteza altamente anisótropa hacia el NO. La interacción entre ambos bloques dió lugar al desarrollo de estructuras compresivas y transcurrentes, reactivando en forma selectiva depocentros extensionales y corrimientos gondwánides (Silvestro y Zubiri, 2008).

La etapa Farallón (Cenomaniano- Maastrichtiano) produjo una rotación antihoraria del campo de esfuerzos al Oeste-Este, el cual generó una leve deformación en el sector axial y en el sector occidental del sistema de Huincul (Mosquera *et al.*, 2011).

La deformación cenozoica (estadio Nazca) estuvo caracterizada por dos eventos puntuales. El principal tuvo lugar en el Mioceno, donde se produjo el desarrollo de la faja plegada y corrida (FPC) del Agrío (Zamora Balcarce *et al.*, 2006) y la exhumación del sector occidental de la dorsal con una reactivación de las estructuras del sector axial central. El segundo evento de edad pliocena, dió lugar al colapso extensional de las estructuras del sector axial (Mosquera y Ramos 2006).

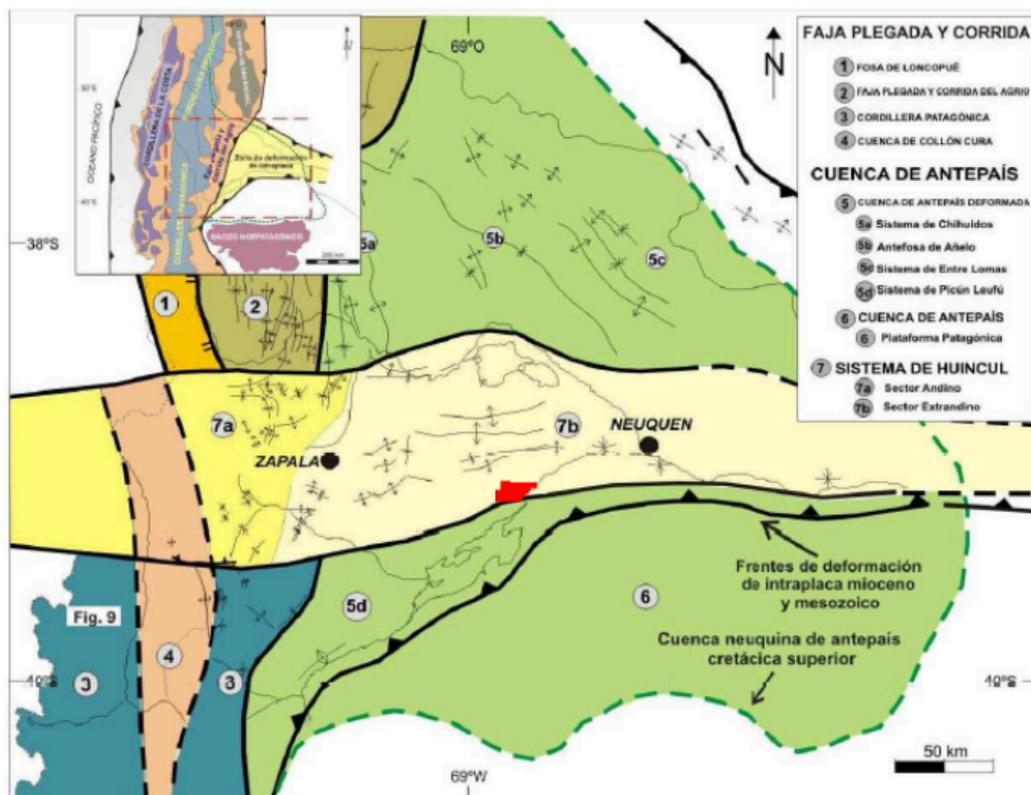


Figura 5. Ubicación del área de estudio (área color rojo) en el depocentro de Picún Leufú y el sector extrandino de la Dorsal de Huincul (modificado de Mosquera *et al.*, 2011).

En este contexto, el basamento de la cuenca se habría desarrollado en el núcleo axial metamórfico y plutónico (Macizo Norpatagónico) y en el sector de procuña (sierras de Lihué Calel, Gould y Carapacha) de la FPC de los Gondwánides (Mosquera *et al.*, 2011) (Fig. 6), mientras que la zona axial de la Dorsal de Huincul y la subcuenca de Picún Leufú estarían vinculadas al *upper plate* de la colisión del terreno Patagonia (Mosquera *et al.*, 2011).

Por otro lado, las anisotropías extensionales del Triásico Superior al Jurásico Inferior constituyeron un factor de primer orden en la evolución sedimentaria de la cuenca. Se atribuye a un período de transición entre el desarrollo de los Gondwánides durante el Pérmico Inferior y la fragmentación de Gondwana durante el Jurásico y el Cretácico (Franzese y Spalletti, 2001) en el cual se produjo en el subsuelo de la Cuenca Neuquina, un denso mosaico de depocentros extensionales, con geometría de hemigraben. Los mismos se generaron como producto de un campo extensional de orientación NE que dio lugar a hemigrábenes con dos direcciones predominantes, NO y O-E. Este segundo grupo de hemigrábenes se asoció al colapso extensional de los corrimientos gondwánides, el cual habría controlado al menos parcialmente la extensión, sugiriendo un mecanismo tipo *basin and range* (Uliana *et al.*, 1995; Vergani *et al.*, 1995 y Mosquera, 2008) para la etapa de *rift* de la Cuenca Neuquina.

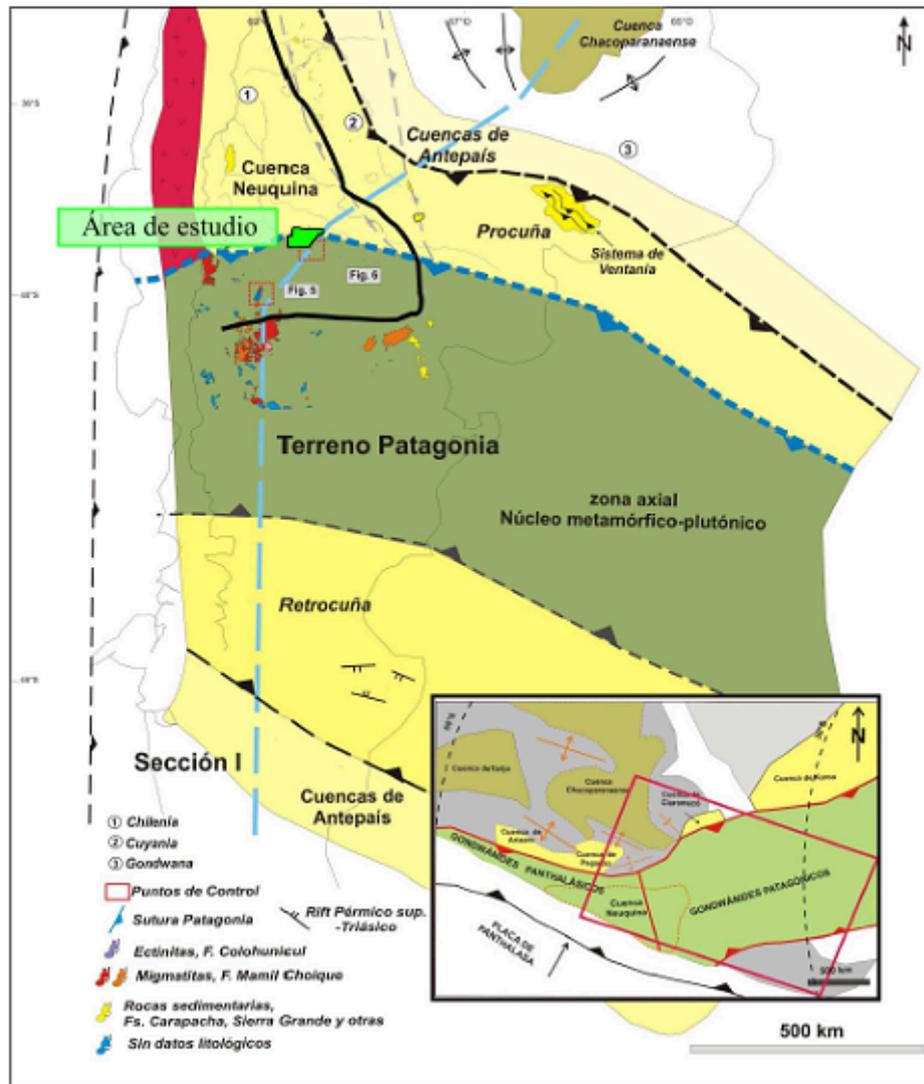


Figura 6. Ubicación del área de estudio (color verde) en el ámbito de la zona axial de la faja plegada y corrida de los Gondwánides (modificado de Mosquera *et al.*, 2011).

5.2.2 Depocentro Picún Leufú

En el ámbito del depocentro de Picún Leufú, el relieve del basamento está caracterizado por los altos del anticlinal de Piedra del Águila y Ezequiel Ramos Mexía y el depocentro de China Muerta, todos con una orientación preferencial este-oeste (Fig. 7).

Un aspecto muy importante a destacar en cuanto a la caracterización del basamento de la Cuenca Neuquina, es la diferencia en un rasgo superficial como la fábrica del mismo al norte y sur de la dorsal, vinculado a un importante cambio en la rigidez flexural (Sigismondi, 2013). En este sentido, la elevada rigidez de la Dorsal de Huincul, inmoviliza la propagación de la deformación hacia el este de la cuenca en la etapa de antepaís y a partir de este rasgo morfoestructural, la rigidez flexural cambia drásticamente de rumbo, caracterizándose hacia el norte de la dorsal por una anisotropía en dirección oeste-este, para convertirse en norte-sur desde la Dorsal de Huincul hacia el sur.

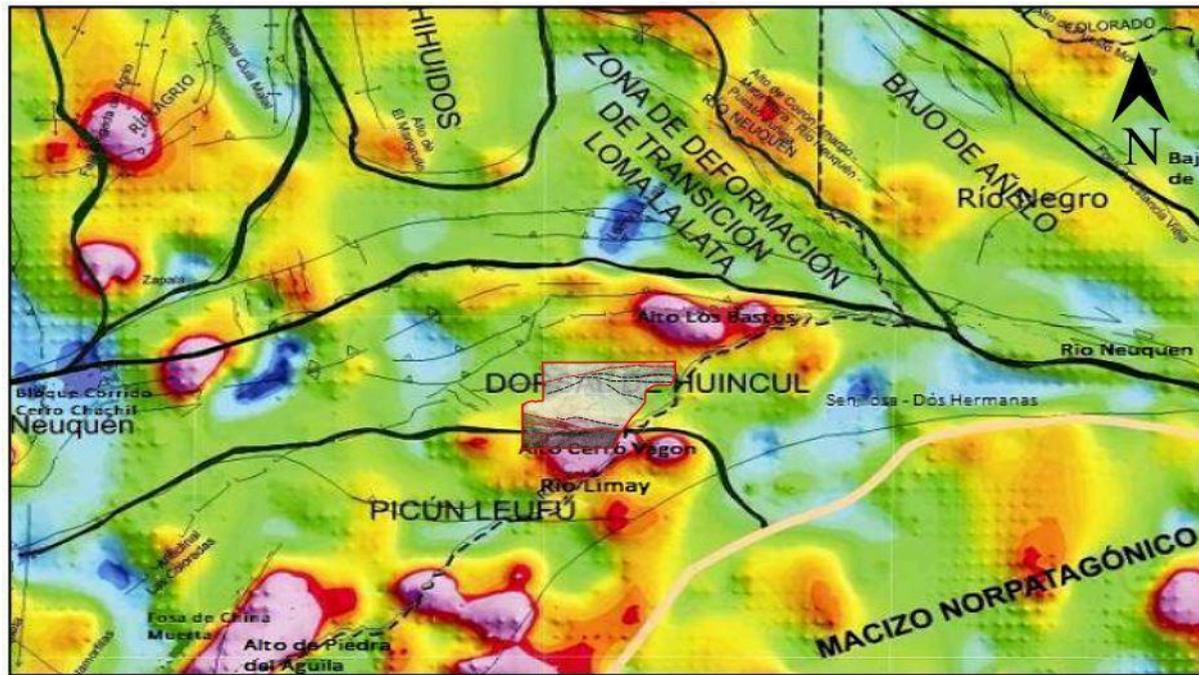


Figura 7. Imagen estructural de gravimetría de depocentros (color celeste y verde) orientados en dirección este-oeste en la región de Picún Leufú, asociados al control de fajas de debilidad paleozoicas (modificado de Sigismondi, 2013). En recuadro de color rojo se detalla el área de estudio.

Asimismo, la rigidez flexural influye sobre la partición de la deformación. Esta propiedad, asociada al régimen de convergencia oblicuo (Folguera *et al.*, 2002) le otorga a la Cuenca Neuquina dos dominios fundamentales: baja o nula partición relativa, la cual originaría la faja plegada y corrida del Agrio - Chos Malal - Malargüe, la deformación de arco y antearco y una zona sismogénica más amplia y trabada; y alta partición desde la Dorsal de Huincul hacia el sur, donde el vector de convergencia andino se descompone en dos direcciones aproximadamente perpendiculares entre sí originando la zona de falla de Liquiñe-Ofqui con dirección norte-sur, y la Dorsal de Huincul oeste-este, con mecanismos dominantes de transurrencia (Sigismondi, 2013).

A partir de lo mencionado, se pueden diferenciar tres dominios en el mapa de rigidez derivado de gravimetría; baja rigidez al oeste; media rigidez en el antepaís y elevada rigidez al sur (Fig. 8). Este comportamiento litosférico, asociado a la orientación espacial del vector de convergencia cambiante en el tiempo geológico, ha jugado un papel fundamental en la evolución tectónica del área de estudio en comparación con la porción septentrional de la Cuenca Neuquina (Sigismondi, 2013).

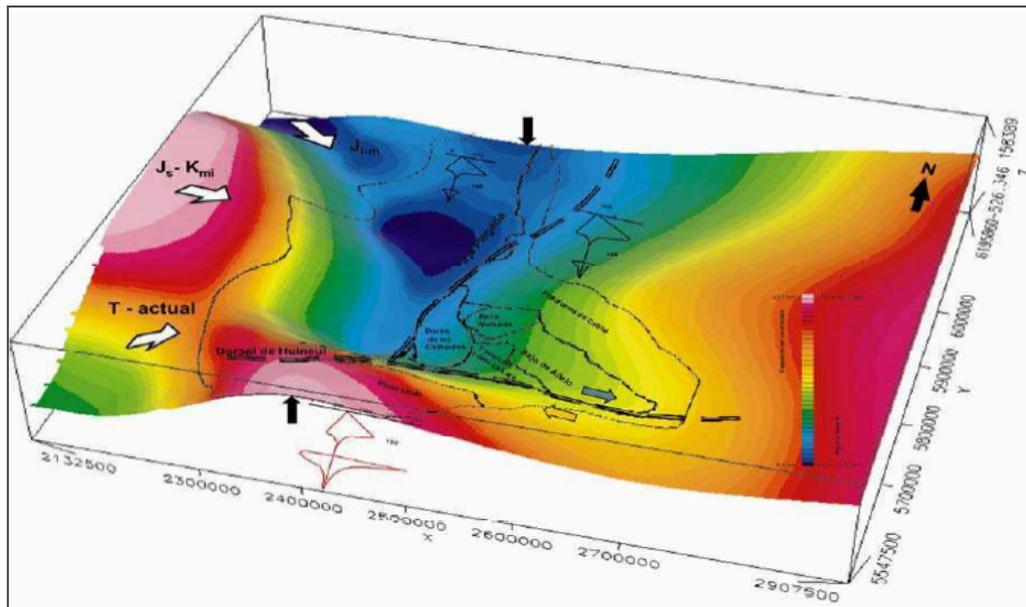


Figura 8. Esquema evolutivo de rigidez flexural donde se detallan los diferentes estadios del vector de convergencia desde el Jurásico Inferior al presente (flechas blancas). Asimismo, la partición de la deformación se encuentra vinculada a la rigidez cortical, siendo al norte de la dorsal de Huincul, relativamente baja con respecto al sur, por lo cual la deformación estuvo fuertemente controlada por el campo de esfuerzos del vector de convergencia (extraído de Sigismondi, 2013).

Los análisis y estudios de superficie en el depocentro de Picún Leufú permitieron definir que, a partir de la tectónica compresional que dió inicio al Ciclo Patagonídico, se produjo una nueva reactivación de la Dorsal de Huincul la cual habría delimitado transversalmente a la cuenca en dos grandes cubetas de sedimentación, tal y como se mencionó previamente. La cubeta situada al sur de la dorsal (depocentro de Picún Leufú) habría conformado, en este contexto geotectónico, una extensa depresión (Garrido, 2011) (Fig. 9).

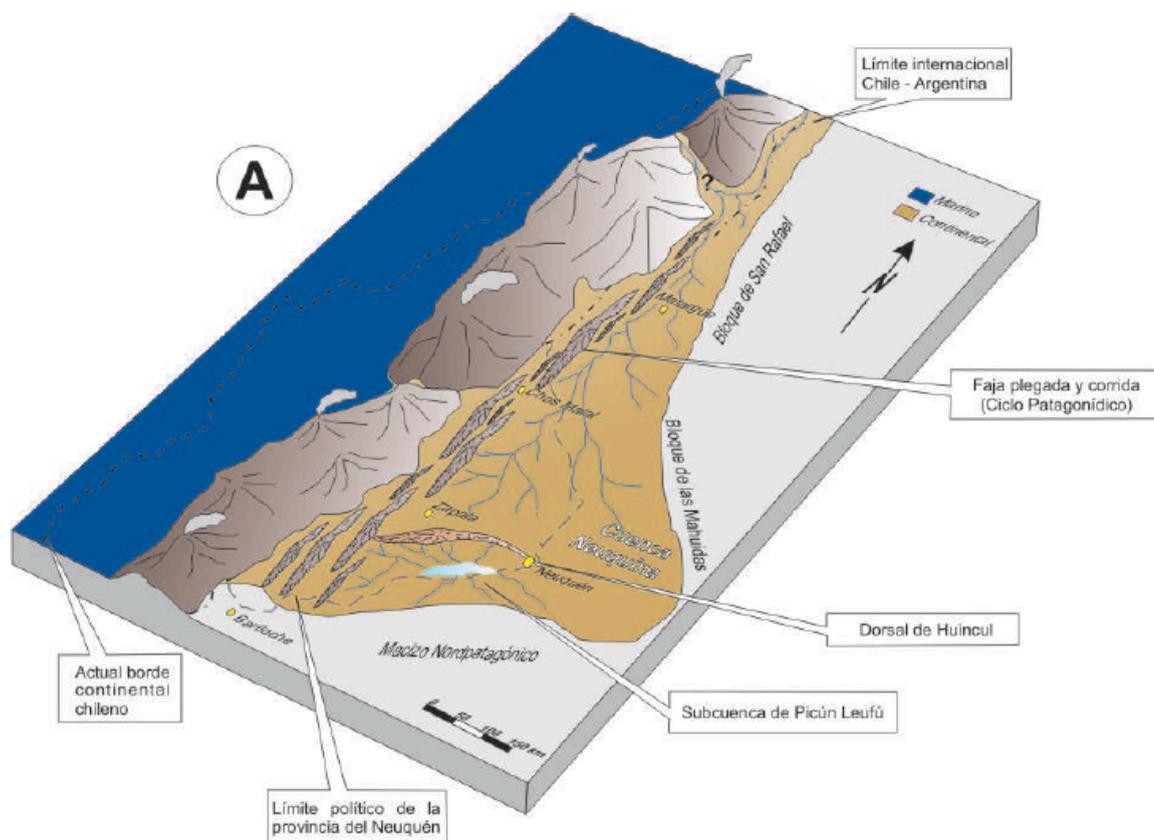


Figura 9. Esquema paleogeográfico de la Cuenca Neuquina durante la depositación del Gr. Neuquén. La dorsal de Huincul habría actuado como un elemento positivo, delimitando hacia el sur al depocentro de Picún Leufú (extraído de Garrido, 2011).

Esta condición se habría mantenido, al menos, hasta fines de la depositación de la Fm. Candeleros; luego de lo cual la influencia de la dorsal sobre el desarrollo de la secuencia sedimentaria habría sido nula o de escasa importancia (Fig. 10). Esto tiene una clara denotación en el desarrollo de las facies sedimentarias correspondientes a la Fm. Candeleros, donde los depósitos basales de esta unidad situados al norte de la dorsal se encuentran ausentes en el área sur. Contrariamente, los depósitos superiores de esta unidad están representados a ambos lados de la dorsal, siendo en este caso esta última estructura la que habría ejercido un mayor control sobre la depositación (Garrido, 2011). Tanto la Dorsal de Huincul como el Macizo Nordpatagónico, habrían funcionado como importantes áreas de aporte de material epiclástico en el depocentro de Picún Leufú. A partir de la depositación de la Fm. Huincul y hasta la culminación de la depositación del Gr. Neuquén, la Dorsal de Huincul ya no conformaría un elemento divisorio importante dentro de la cuenca (Fig. 10). Sincrónicamente, se produce un cambio sustancial en el grado de incidencia e importancia de cada una de las áreas de aporte (Garrido, 2011).

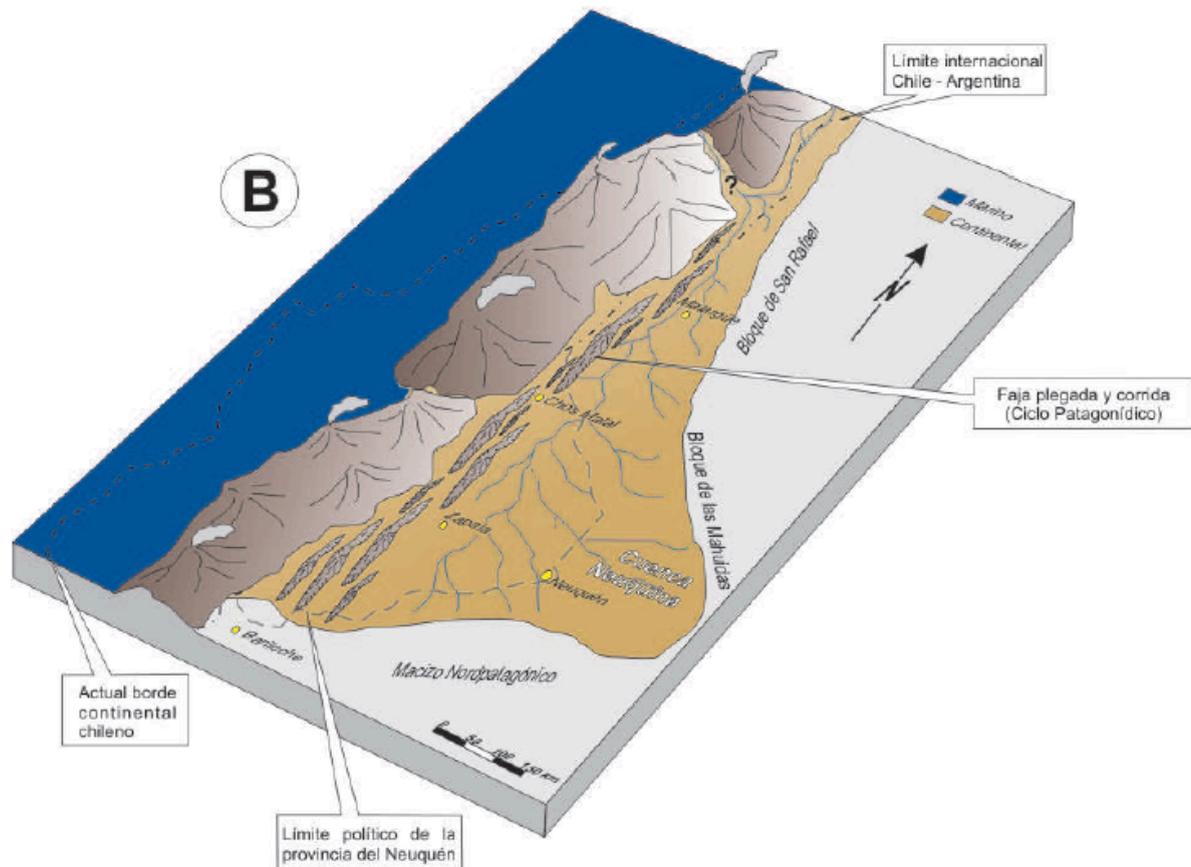


Figura 10. Modelo paleogeográfico desarrollado durante la depositación de la Fm. Huincul y de los Sbgrs. Río Neuquén y Río Colorado. Durante este lapso de tiempo, la dorsal de Huincul tuvo escasa o nula influencia en el desarrollo sedimentario de la cuenca (extraído de Garrido, 2011).

5.3 Elementos del sistema petrolero en el área de estudio

El sistema petrolero es un sistema natural, que incluye todos los elementos y procesos geológicos esenciales para que un yacimiento de hidrocarburos exista en la naturaleza. Los elementos esenciales son: la roca generadora, reservorio, sello y trampas. Los procesos vinculados a la generación del sistema son la formación de la trampa y la generación, migración, acumulación y preservación del hidrocarburo. Todos los elementos esenciales deben darse en un tiempo y espacio determinado para que puedan ocurrir todos los procesos que dan origen a la acumulación de hidrocarburos.

Teniendo en cuenta lo definido por Legarreta *et al.*, (2008); las acumulaciones que tienen similitudes en cuanto a rocas generadoras, migración, reservorios y trampas pueden considerarse como Distritos Productivos. Dentro de la Cuenca Neuquina existen 8 Distritos Productivos, los cuales son denominados como: 1. Distrito Puesto Rojas-El Portón, 2. Distrito Llancanelo, 3. Distrito Sierra Negra, 4. Distrito Catriel, 5. Distrito Estancia Vieja, 6. Distrito Huincul, 7. Distrito Sur Dorsal y 8. Distrito La Lata (Fig.11).

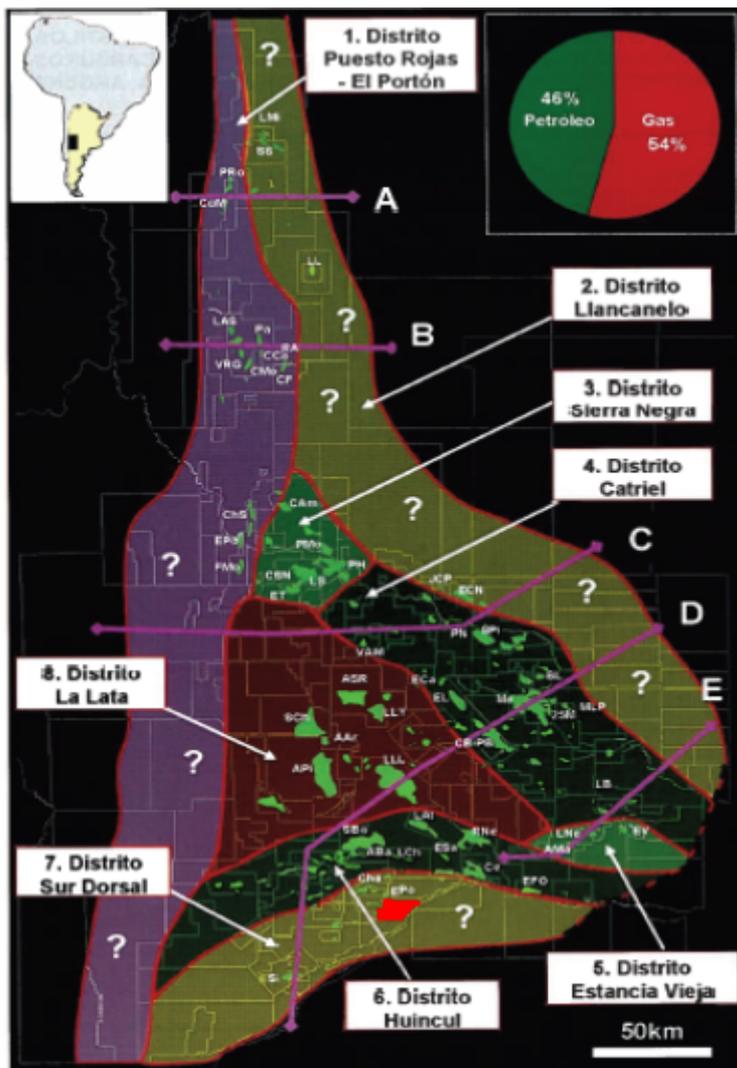


Figura 11. Ubicación de los Distritos Productivos. El área de estudio (color rojo) se encuentra dentro del Distrito Sur Dorsal (modificado de Legarreta *et al.*, 2008).

El área de estudio se localiza en el Distrito Sur Dorsal (Fig. 11), donde las principales acumulaciones económicas se vinculan al ámbito de la Dorsal de Huincul. El sistema petrolero convencional de primer orden en este distrito es el designado como Vaca Muerta-Quebrada del Sapo (Pángaro *et al.*, 2005). Existen reservorios jurásicos y cretácicos de segundo orden como es el caso del Precuyo y las Fms. Challacó, Lotena, Quintuco y Agrio (Fig. 12).

Con el auge de los hidrocarburos no convencionales, las sucesiones de margas bituminosas correspondientes a la Fm. Vaca Muerta podría actuar como un importante reservorio no convencional y de esta manera, dar lugar a un nuevo sistema petrolero Vaca Muerta-Vaca Muerta.

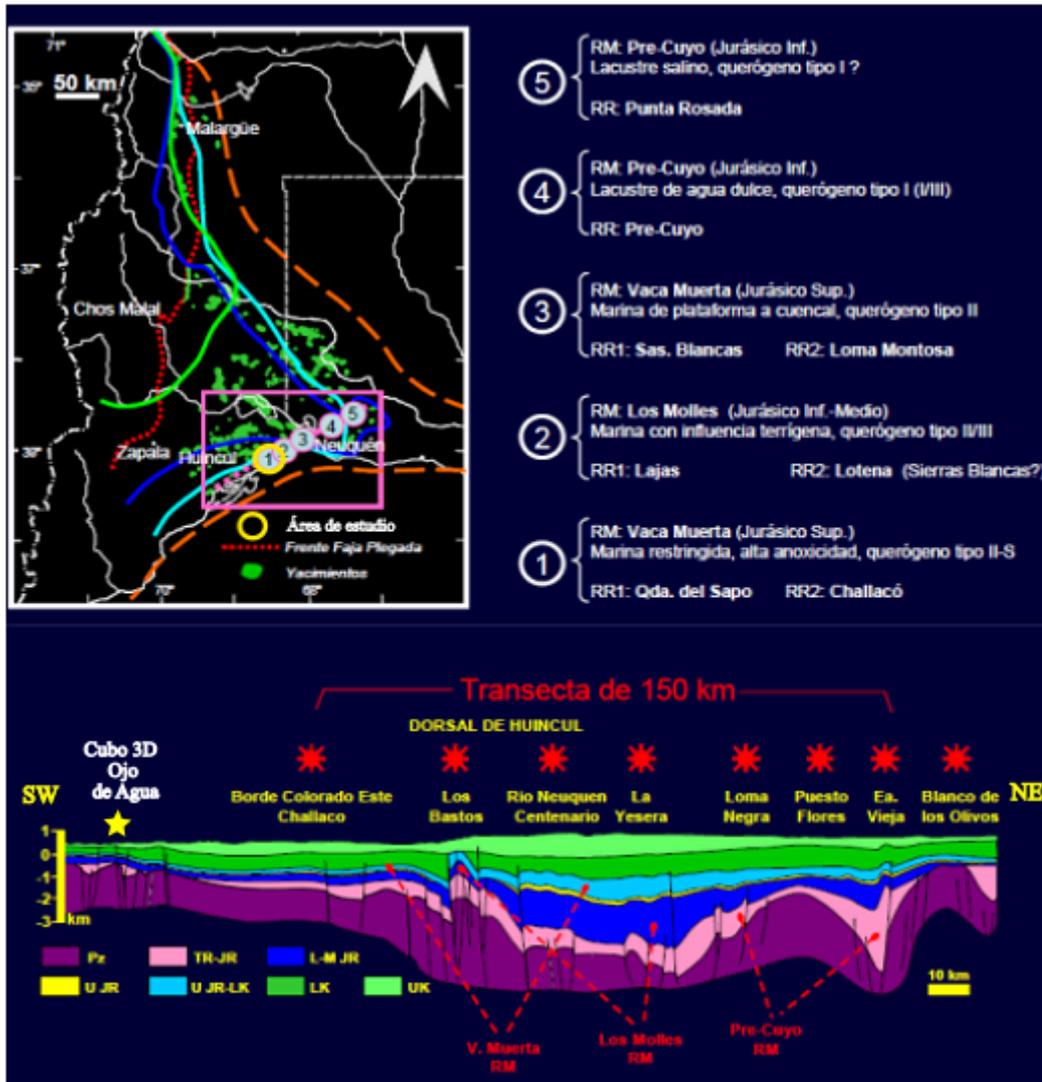


Figura 12. Transecta de rumbo SO-NE donde se detallan las rocas generadoras en el ámbito de la Dorsal de Huincul y el conjunto de fallas existentes que actuaron como posibles vías de migración (modificado de Villar *et al.*, 2005). Con estrella de color amarilla se señala la ubicación aproximada del área de estudio.

5.3.1 Rocas generadoras

El Distrito Sur Dorsal, involucra petróleos originados en secciones de la Fm. Vaca Muerta. La roca generadora contiene querógeno tipo II-S (rico en azufre), acumulado en ambiente marino restringido y euxínico. Dentro del área de estudio, la Fm. Vaca Muerta se encuentra en ventana de generación de petróleo negro (Fig. 13). A su vez, el espesor de la roca madre es limitado en comparación con otras localidades de la cuenca. Los petróleos asociados están bien preservados, son medio-pesados a intermedios, ricos en azufre y viscosos. La existencia de hidrocarburos gaseosos es exigua, lo cual está en línea con el bajo grado de maduración térmica de la roca madre (Villar *et al.*, 2005).

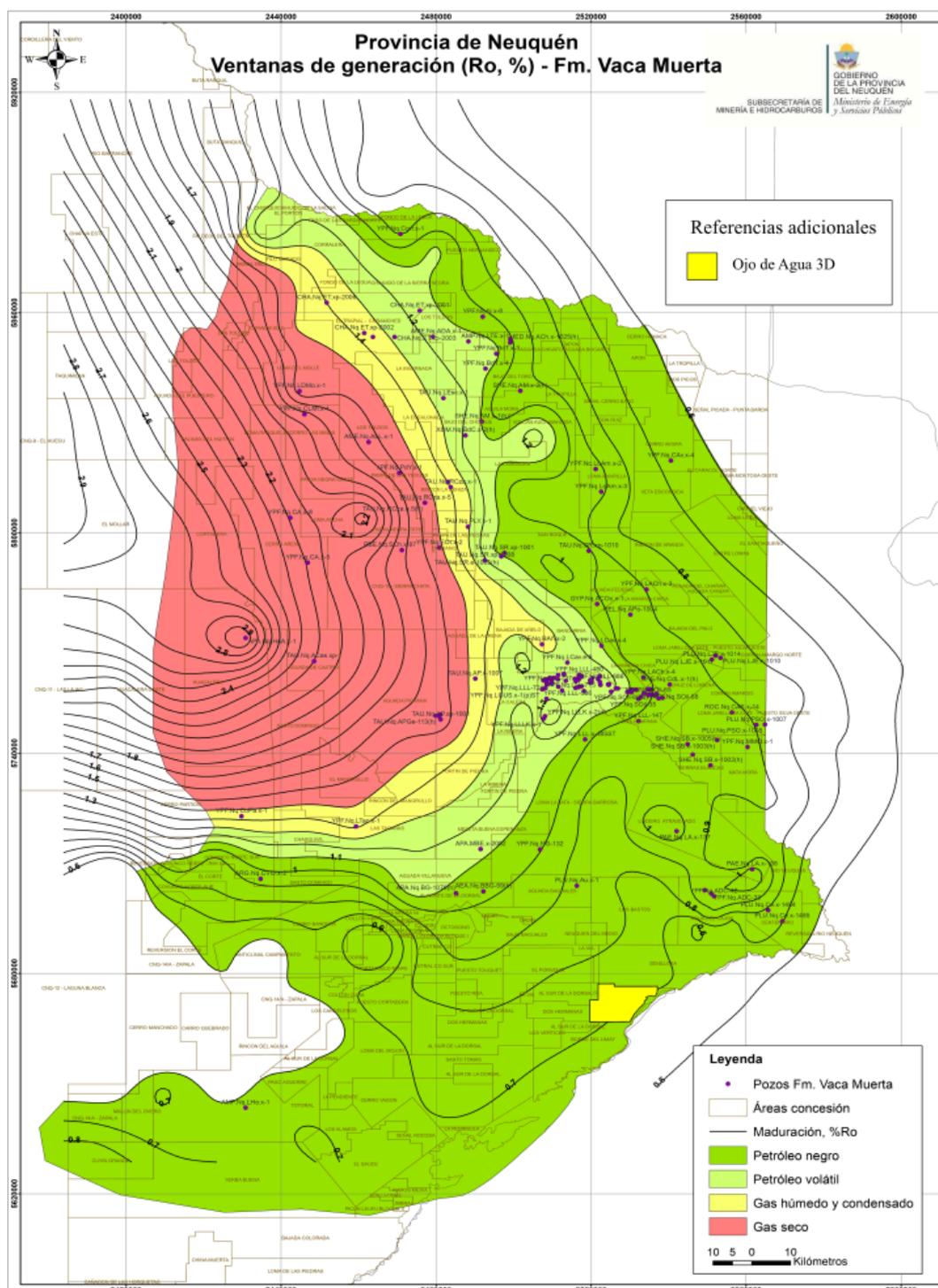


Figura 13. Mapa de ventana de generación de hidrocarburos de la Fm. Vaca Muerta. El área de estudio se resalta en color amarillo. La Fm. Vaca Muerta se encuentra en ventana de petróleo negro (modificado de la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén, 2022).

Una roca generadora alternativa dentro de este distrito productivo se vincula a la presencia de la Fm. Los Molles. Sin embargo, un análisis minucioso dentro de este distrito hidrocarburífero, menciona que la participación minoritaria, tanto de hidrocarburos líquidos como gas, generados a partir de esta unidad, deben ser estudiados con mayor detalle (Legarreta

et al., 2008). En este sentido, al observar el mapa de ventanas de generación correspondiente a la Fm. Los Molles, se denota la ausencia de esta unidad dentro del área de estudio (Fig. 14).

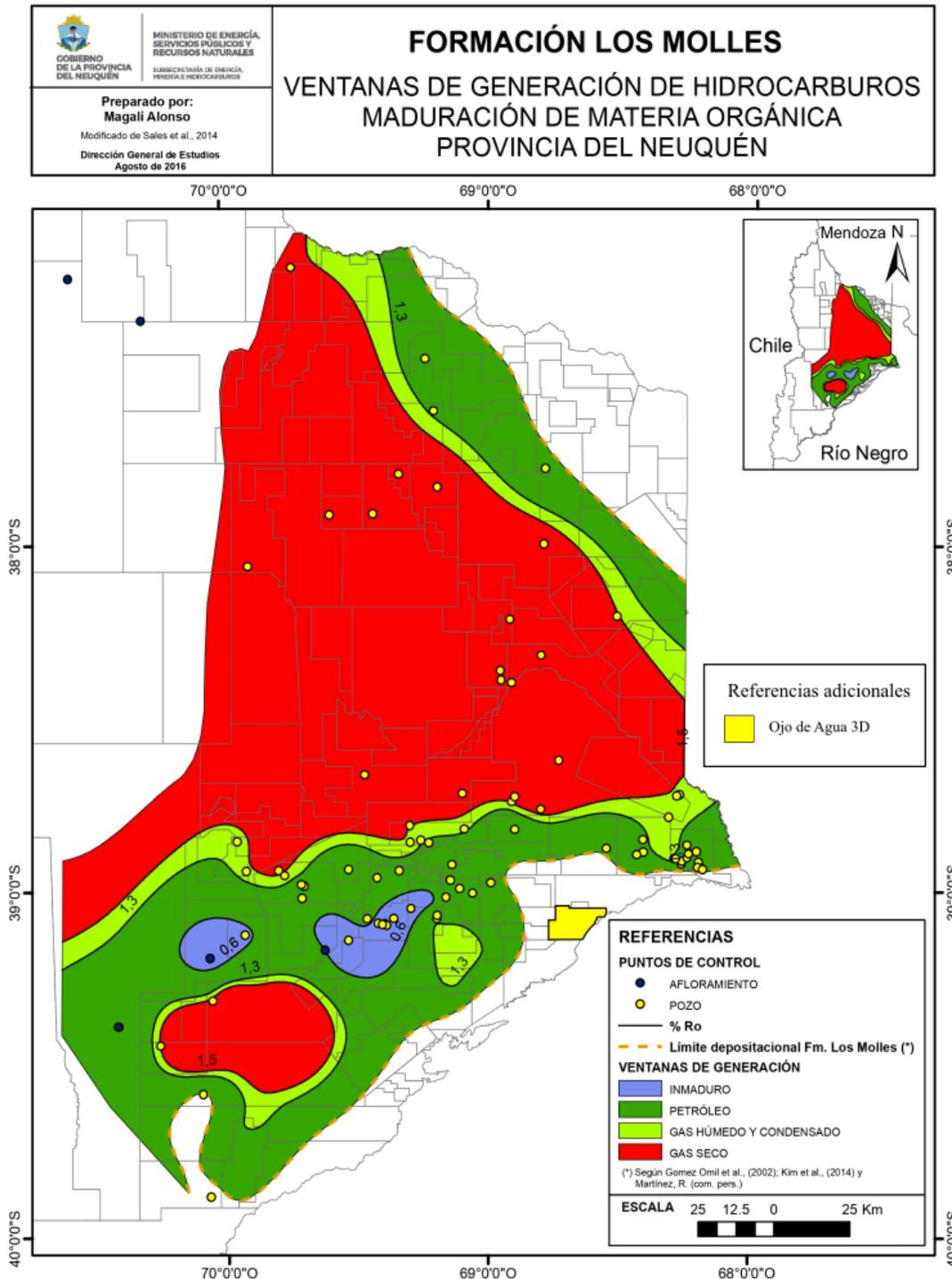


Figura 14. Mapa de ventana de generación de hidrocarburos de la Fm. Los Molles.. El área de estudio se resalta en color amarillo. La Fm. Los Molles no se encuentra en ventana de generación dentro del área de estudio (modificado de la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén, 2022).

5.3.2 Reservorios

En el ámbito del área de estudio, según registros de perforaciones, los principales reservorios convencionales corresponden a las unidades de las Fms. Challacó, Quebrada del

Sapo (*equivalente a Zona de Relleno*), Quintuco, Agrío y las sucesiones volcanoclásticas del Precuyo, conformando un importante reservorio de gas (*Pioneer Natural Resources, 2002*).

Por otra parte, las lutitas orgánicas de la Fm. Vaca Muerta funcionan como un reservorio no convencional del tipo *shale oil*.

Los reservorios del Triásico Superior y Jurásico Inferior presentan condiciones más desfavorables que los del Jurásico Superior (Zumel *et al.*, 2002). Para el caso de los depósitos precuyanos, se vinculan a sucesiones volcanoclásticas y silicoclásticas cuyas características petrofísicas son sumamente variables. En base a recortes de perforación se determinó la presencia de una sucesión continua de conglomerados y areniscas conglomerádicas, areniscas tobáceas, de color gris medio, castaño anaranjado medio, subangulosa, regularmente seleccionada, cuarzosa con abundantes líticos porfiríticos de tonos gris verdosos oscuros y anaranjados, matriz tobácea, moderada consolidación. Hacia la base se presenta una roca ígnea, de aspecto básico, microcristalina, gris oscuro a gris verdoso oscuro, pirita diseminada, fractura irregular a subbloque, dura. Se detectaron rastros de hidrocarburos pesados y gas (*Pioneer Natural Resources, 2002*).

El Gr. Cuyo, comprende una sucesión continua de areniscas gruesas a medianas, en parte conglomerados, rosado claro, castaño rojizo, angulosa, subangulosa, regularmente seleccionada, cuarzosa con abundantes líticos rosados y matriz arcillosa, dentro de las cuales se detectó presencia de gas (*Pioneer Natural Resources, 2002*).

Las sucesiones sedimentarias del Jurásico medio-Superior correspondiente a las Fm. Challacó (*Serie Challacó*) se encuentra definida por psefitas y psamitas de variada granulometría, dentro de las cuales se detectó la presencia y rastros de hidrocarburos negros y secos. Asimismo, la Fm. Quebrada del Sapo (*Zona de Relleno*) constituida por conglomerados y areniscas conglomerádicas, de textura clasto soporte a matriz soporte, contienen una importante reserva de hidrocarburos líquidos y gas.

Los reservorios cretácicos productivos en el ámbito de la dorsal corresponden a las Fms. Quintuco, compuesta por calizas y arenas calcáreas de ambiente litoral (Olmos *et al.*, 2002) y Centenario (Pángaro *et al.*, 2005). Sin embargo, en el área de estudio, las sucesiones correspondientes a la Fm. Centenario no presenta interés petrolero.

En la Fig. 15 se representa un cuadro cronoestratigráfico con las principales unidades litoestratigráficas presentes en el ámbito de la Dorsal de Huincul.

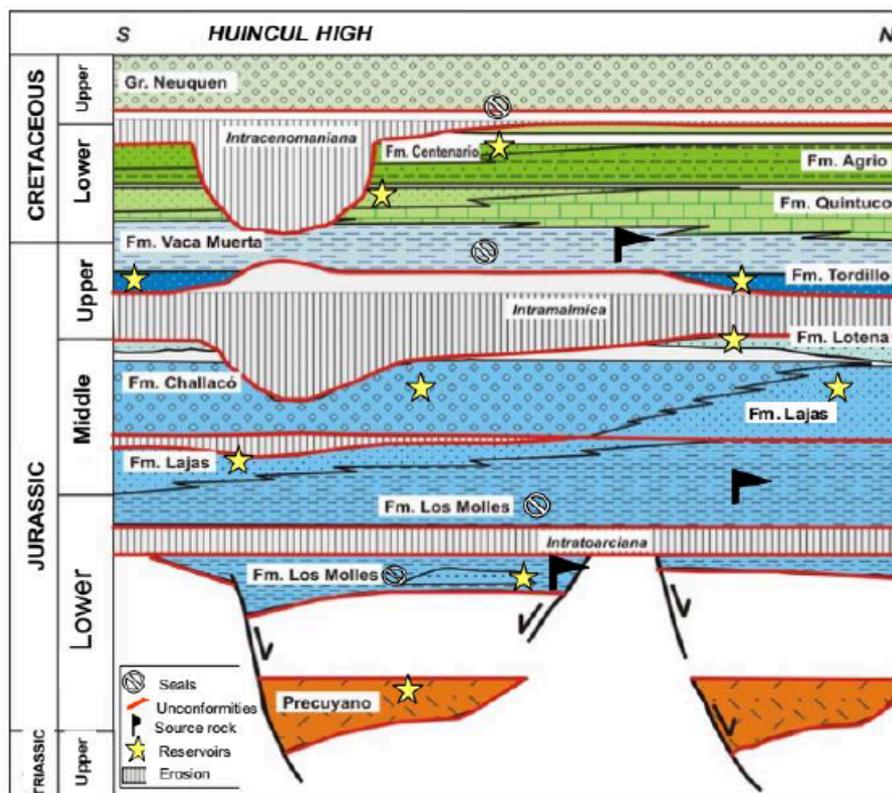


Figura 15. Cuadro cronoestratigráfico generalizado en el ámbito de la Dorsal de Huincul (Pángaro *et al.*, 2005).

5.3.3 Estilos de entrapamiento

En el ámbito de la Dorsal de Huincul, los estilos de entrapamientos son muy variados, la gran mayoría de las trampas se encuentran vinculadas al tren de estructuras anticlinales de rumbo E-O predominantes en el rasgo morfoestructural mencionado, vinculadas a fallas compresivas y fracturas extensionales reactivadas en diferentes pulsos tectónico (Pángaro *et al.*, 2005). Además, existen rasgos estratigráficos importantes que le otorgan a la zona de estudio una impronta característica al estilo de entrapamiento, como es el caso de cuñas clásticas vinculadas a la etapa de *synrift*, rasgos erosivos vinculados a discordancias, truncamientos, entre otros, los cuales definieron importantes cambios en las propiedades petrofísicas de las rocas (Legarreta *et al.*, 2008).

5.3.4 Vías de migración

La roca generadora en el ámbito de la Dorsal de Huincul y el depocentro de Picún Leufú, se localizó a 20 y/o 40 km de distancia de estos rasgos morfoestructurales para el Cretácico Superior (Pángaro *et al.*, 2005). Las acumulaciones comerciales en el ámbito de la dorsal solo fueron posibles debido a la excelente calidad petrofísica de las Fms. Tordillo y/o Quebrada del Sapo y Lajas, las cuales actuaron como *carrier beds* para el hidrocarburo entrapado en la gran mayoría de los yacimientos a través de una prolifera migración lateral desde la “cocina” ubicada en el centro de cuenca. Además, existe migración vertical y remigración de hidrocarburos previamente entrapados asociada a numerosos trenes de fallas transtensivas que constituyen un rasgo característico de numerosas estructuras de la dorsal (Legarreta *et al.*, 2008).

5.3.5 Sellos

Los principales y bien conocidos sellos de la Cuenca Neuquina se atribuyen a las unidades silicoclásticas, calcáreas y evaporíticas de las Fms. Barda Negra y Auquilco correspondientes al Gr. Lotena (Leanza *et al.*, 1997). Estas unidades litoestratigráficas se desarrollan ampliamente en el anticlinal de Picún Leufú, a lo largo de la sierra de la Vaca Muerta, Loncopué, oeste de Chos Malal, Chacay Melehue y Vega de la Veranada en la provincia de Neuquén y en la sierra de Reyes, sierra Azul y Bardas Blancas, entre otras localidades, en el sur mendocino (Arregui *et al.*, 2011).

En el subsuelo de la cubeta neuquina se encuentran extensamente desarrolladas, mostrando los mayores espesores en el sector central y adelgazándose hacia los bordes de la cuenca. Particularmente, en el área de estudio, estas formaciones no se encuentran desarrolladas a nivel de afloramientos y tampoco en subsuelo (Fig. 16).

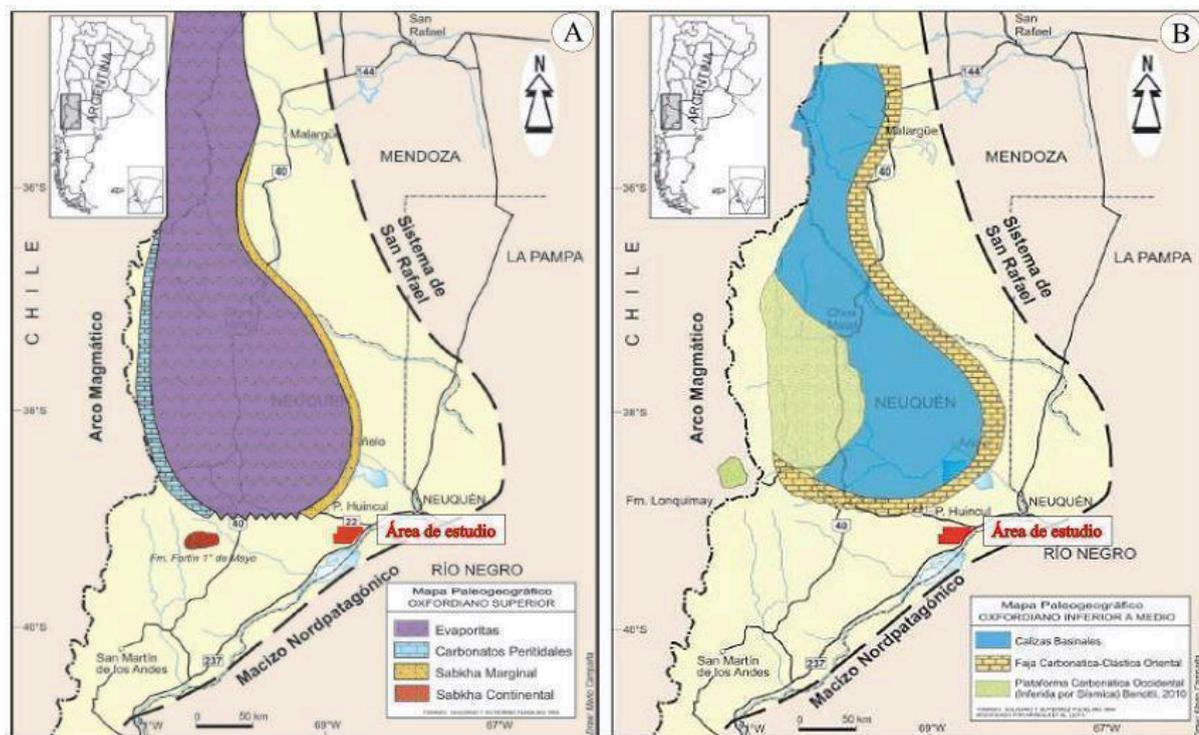


Figura 16. A) Mapa paleogeográfico de la Fm. Auquilco. B) Mapa paleogeográfico de las Fms. La Manga y Barda Negra (modificado de Arregui *et al.*, 2011).

Con lo mencionado previamente y debido a su gran distribución en la cuenca, el principal sello en el área de estudio correspondería a la Fm. Vaca Muerta. Asimismo, la incipiente erosión producto de los frecuentes pulsos tectónicos acaecidos durante el Mesozoico y parte del Cenozoico produjeron importantes cambios en las propiedades petrofísicas de las rocas, lo cual pudo originar sellos restringidos en ciertas áreas. (Legarreta *et al.*, 2008).

6. MARCO TEÓRICO

6.1 Adquisición del dato sísmico

El método de sísmica de reflexión es el más utilizado en la prospección terrestre de hidrocarburos implica el uso de un frente de ondas acústicas generado por una fuente (impulsiva o vibratoria) ubicada en superficie, el cual se propaga por el subsuelo, se refleja y refracta en las diferentes interfases y es registrado por una serie de receptores (geófonos) ubicados en superficie. De esta manera se obtienen los tiempos de ida y vuelta de las distintas reflexiones en cada interfase del subsuelo.

En la medida que las diferentes capas o niveles litológicos, que definan las diferentes interfases del subsuelo, tengan un mayor contraste de impedancia acústica, la energía reflejada será mayor. A través de la atenuación de señales no deseadas generadas por la fuente de energía y asociadas a las reflexiones ocurridas, se pretende obtener una imagen de la mejor calidad posible de las principales interfases del subsuelo denominada sección sísmica o registro sísmico (Fig.17).

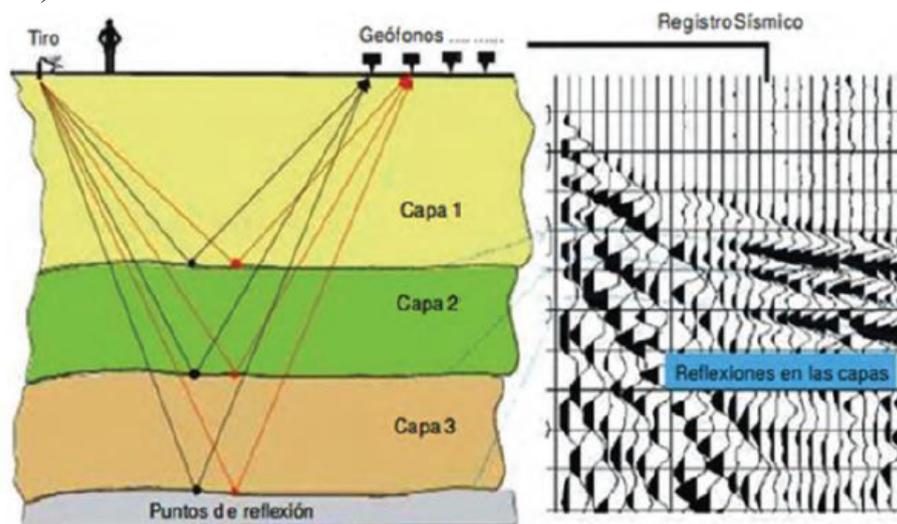


Figura 17. Esquema representativo del método sísmico de reflexión (Cátedra de Geofísica UNCo, 2021).

La propiedad de las rocas que permite reconocer las interfases de las rocas a través de la sísmica es la impedancia acústica, que se define como la resistencia que presentan las mismas al paso de las ondas acústicas y corresponde al producto entre la densidad de la roca y la velocidad de propagación de las ondas acústicas (ecuación 1).

$$Z = V \times \rho \quad (1)$$

Z: Impedancia acústica; **V:** velocidad; **ρ:** densidad

Tanto la densidad como la velocidad de propagación de las ondas varía dependiendo del tipo de rocas y sus condiciones. Estos parámetros son dependientes de la porosidad, litología, tipo de fluido dentro de la roca, estado de compactación, temperatura, entre otros, lo cual resulta de utilidad para correlacionar características sísmicas con características de las rocas y de esta manera predecir variaciones de parámetros físicos en secciones y mapas. Los contrastes de impedancia se vinculan al coeficiente de reflexión de la interfase, el cual se define como la proporción de energía reflejada en cada interfase (ecuación 2).

$$CR = (Z2 - Z1) \div (Z2 + Z1) \quad (2)$$

Z1= Impedancia acústica del medio 1; **Z2**= Impedancia acústica del medio 2

Las distintas reflexiones en cada interfase del subsuelo se rigen por las siguientes leyes y principios:

Primera Ley de Snell: establece que, si un frente de onda incide sobre una interfase, una parte de la energía se refleja con el mismo ángulo de incidencia θ_1 . El porcentaje de energía reflejada será mayor, en la medida que los medios o capas que definen la interfase tengan mayor contraste de impedancia acústica o coeficiente de reflexión (Fig. 18).

Segunda Ley de Snell: establece la relación entre el rayo incidente en el primer medio con un ángulo de incidencia θ_1 y el rayo refractado en el segundo medio con un ángulo de refracción θ_2 (ecuación 3). Un caso particular de la segunda ley de Snell ocurre cuando hay una reflexión total, producida cuando el ángulo de incidencia (θ_1) tiene un valor determinado (ángulo crítico) y el ángulo transmitido es $\theta_2=90^\circ$. Este caso puede darse siempre y cuando la $V_2 > V_1$ y la perturbación viaje por la interfase que separa los dos medios con la velocidad del medio inferior, de acuerdo con el principio de Fermat (Fig. 18).

$$\text{sen}\theta_1/V_1 = \text{sen}\theta_2/V_2 \quad (3)$$

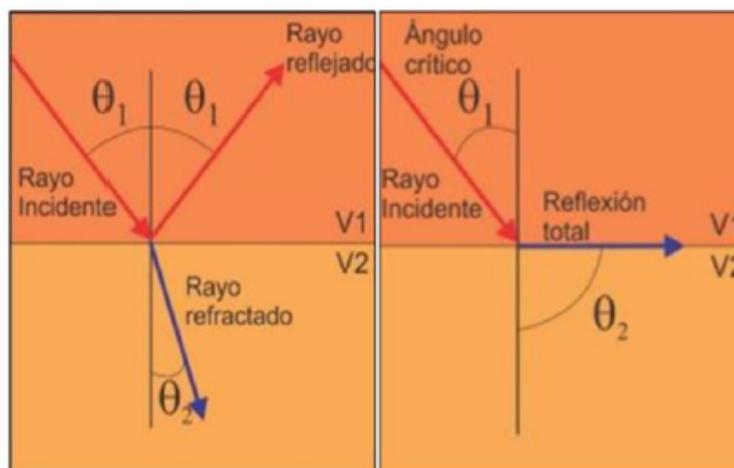


Figura 18. Leyes de Snell. ($V_1 < V_2$)

Principio de Huygens determina que cualquier punto de un cuerpo que es alcanzado por un frente de onda se convierte a su vez en un centro (secundario) de emisión de energía, que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda original.

Principio de Fermat: determina que el trayecto seguido por un frente de onda al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es mínimo.

6.1.1 Adquisición sísmica en el área de estudio

La compañía *Veritas DGC Land Inc.* registró el levantamiento 3D Ojo de Agua en abril de 2004. Se registraron un total de 8.186 puntos de emisión en 8.143 estaciones receptoras. El

levantamiento se superpone con el proyecto 3D Cerro Vagón Norte, habiéndolo realizado el procesamiento en conjunto (Fig. 19).

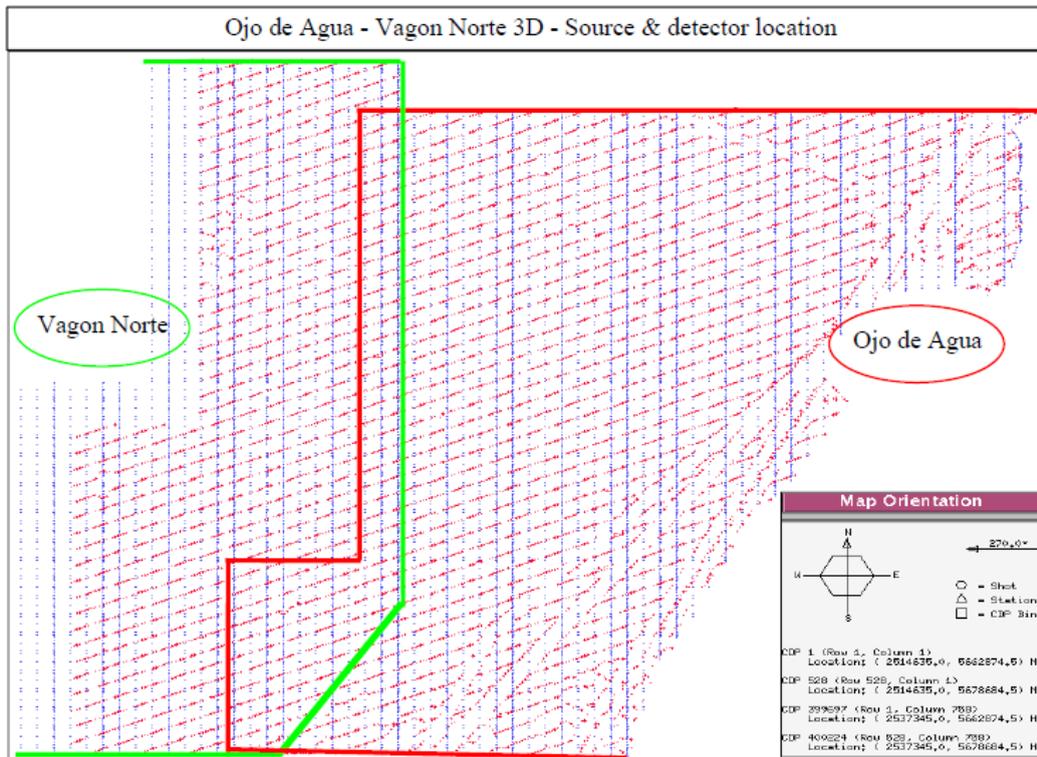


Figura 19. Líneas fuente y receptoras de los Proyectos Cerro Vagón Norte (recuadro de color verde) y Ojo de Agua (recuadro de color rojo). Extraído de *Pionner Natural Resources*, 2004.

Parámetros y diseño de adquisición

El volumen sísmico Ojo de Agua 3D fue diseñado como una geometría diagonal, donde el intervalo de líneas fuente y receptoras fue de 60 m. Las líneas receptoras fueron dispuestas con un ángulo de 0 grados con respecto al norte y las líneas fuente con un ángulo de 71,57 grados con respecto al norte (Fig. 20). El barrido inicial se realizó con un rango de frecuencia de 8-120 Hz. Para el proyecto Ojo de Agua - Cerro Vagón 3D, se ejecutaron un total de 11.855 registros en 13.246 receptores, cubriendo un área de 240 km². El patch de registración fue diseñado con 8 líneas receptoras de 108 estaciones cada una, lo que dió lugar a 864 canales activos y un bin de 30 x 30 m. De esta manera se obtuvo un registro de cobertura total (*full fold*) de 36, mientras que en el sector de superposición de los dos cubos sísmicos se registró un fold máximo de 74 luego del procesamiento de datos (Fig. 21).

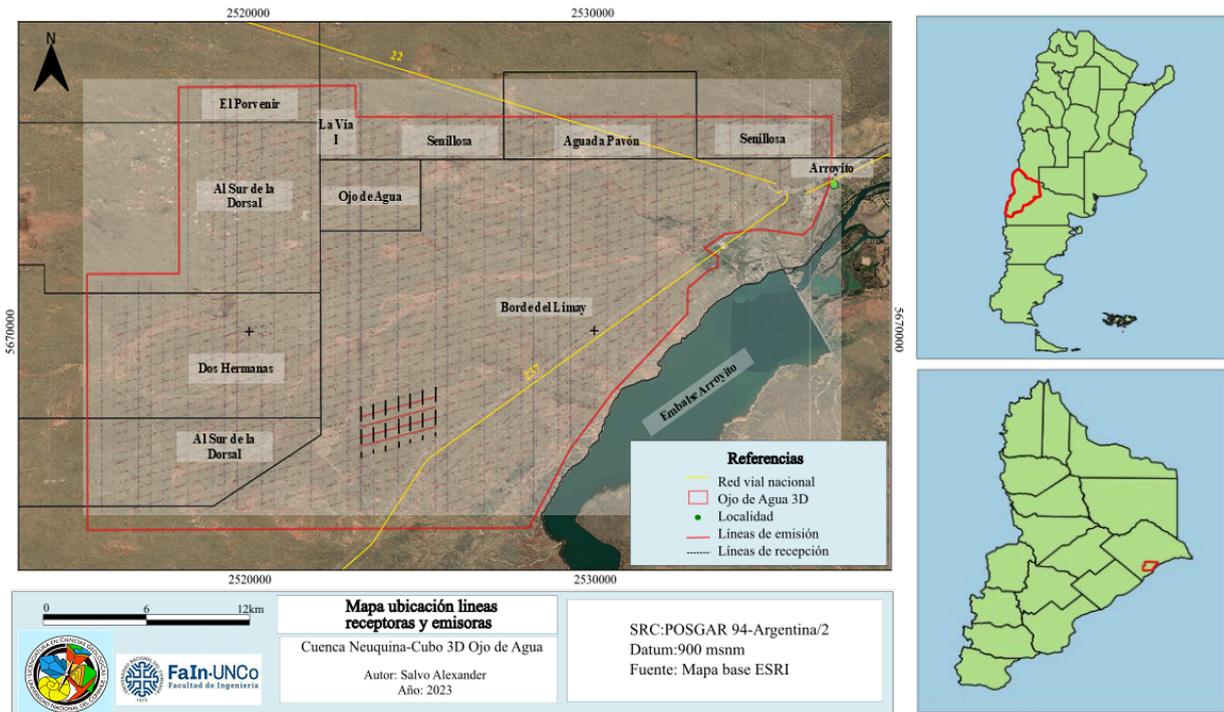


Figura 20. Mapa ubicación de líneas emisoras y receptoras en el área de estudio.

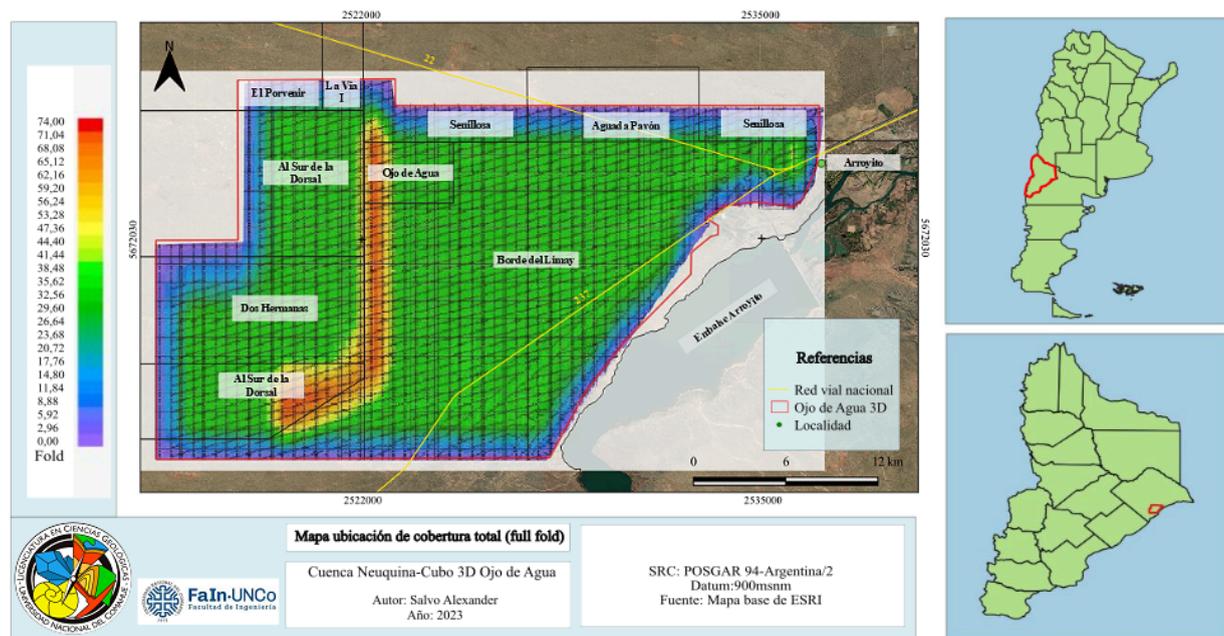


Figura 21. Mapa ubicación de cobertura total (full fold) en el área de estudio.

En las tablas 1 y 2 se resumen algunos de los parámetros de interés durante la etapa de registración y adquisición del dato sísmico.

Proyecto Ojo de Agua 3D								
Líneas receptoras		Líneas de emisión		Información de Patch		Información Fold		
Tamaño de bin	30 m	Tamaño de bin	30	Canales	por	30	Fold	36

				líneas emisoras		nominal	
Espacio entre líneas	60 m	Espacio entre líneas	60	Canales por líneas receptoras	60	Máximo Fold	74
Orientación de líneas respecto al norte	0°	Orientación de líneas respecto al norte	71,57°	Patch máximo	864		
Número de líneas del patch	8143	Número de líneas del patch	8183	Máximo in-line offset (m)	3210,14		
				Máximo cross-line offset (m)	1410,32		
				Máximo patch offset (m)	4001,2		
Cobertura areal del proyecto							176,84 km ²

Parámetros de registración					
Emisión		Recepción		Registración	
Fuente: vibradores	N° de barridos: 4	Tipo de geófonos SM-24 (10Hz)	Intervalo de muestreo: 2 ms	Formato de grabación: SEG-D (8058) IEEE	
N° de vibradores: 2 set de 4 vibradores	Frecuencia inicial de barrido: 8 Hz	N° de geófonos por estación: 12	Tiempo de escucha: 5s	Tipo de cinta: IO Image System 2000	
Distancia entre vibradores: 45 m	Frecuencia final de barrido: 120 Hz	Distancia entre geófonos: 45,83 m	Filtro corta bajos: Out	Ganancia fija: 48dB	
Tipo de arreglo: lineal	Tipo de barrido: lineal	Tipo de arreglo: lineal	Filtro corta alto: ½ NYQ min. fase 135 Hz	Polaridad del sistema: SEG normal	
Taper: 300 ms	Duración del barrido: 8s				

Tabla 1. Parámetros de registración del cubo Ojo de Agua 3D.

Proyecto Cerro Vagón 3D							
Líneas receptoras		Líneas de emisión		Información de Patch		Información Fold	
Tamaño de bin	30 m	Tamaño de bin	30	Canales por líneas emisoras	108	Fold nominal	36
Espacio entre líneas	60 m	Espacio entre líneas	60	Canales por líneas receptoras	8	Máximo Fold	53
Orientación	0°	Orientación	71,57°	Patch	864		

de líneas respecto al norte		de líneas respecto al norte		máximo			
Número de líneas del patch	25251	Número de líneas del patch	23508	Máximo in-line offset (m)	3210,14		
				Máximo cross-line offset (m)	1410,32		
				Máximo patch offset (m)	3506		
Cobertura areal del proyecto Ojo de Agua-Vagón Norte							240 km ²

Parámetros de registración				
Emisión		Recepción		Registración
Fuente: vibradores	Nº de barridos: 2	Tipo de geófonos SM-24 (10Hz)	Intervalo de muestreo: 2 ms	Formato de grabación: SEG-D (8058) IEEE
Nº de vibradores: 2 set de 4 vibradores	Frecuencia inicial de barrido: 8 Hz	Nº de geófonos por estación: 18	Tiempo de escucha: 5s	Tipo de cinta: IO Image System 2000
Distancia entre vibradores: 47,43 m	Frecuencia final de barrido: 120 Hz	Distancia entre geófonos: 56, 51 m	Filtro corta bajos: Out	Ganancia fija: 48dB
Tipo de arreglo: lineal	Tipo de barrido: lineal	Tipo de arreglo: lineal	Filtro corta alto: ½ NYQ min. fase 135 Hz	Polaridad del sistema: SEG normal
Taper: 250 ms	Duración del barrido: 24 s			

Tabla 2. Parámetros de registración y adquisición del proyecto Cerro Vagón 3D.

Con el objetivo de caracterizar la capa meteorizada en el área de estudio, se realizó la registración de 8 upholes y 22 refracciones, utilizando un *datum* final de 900 msnm y una velocidad de reemplazo de 2800 m/s.

Luego de su interpretación, se generaron mapas de velocidades para el *weathering* (Fig. 22) y *subweathering* y de espesores para el primer nivel (Fig. 23).

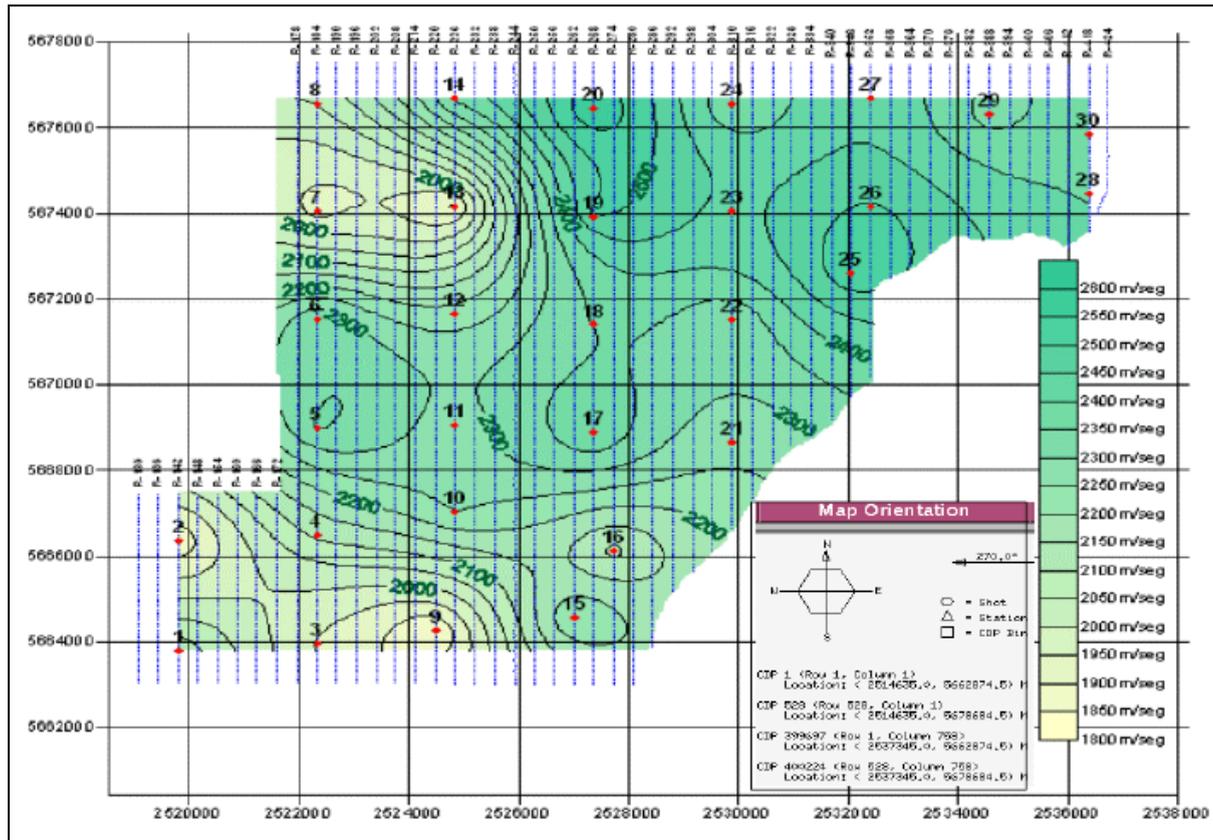


Figura 22. Mapa de velocidades del weathering (extraído de Pionner Natural Resources, 2004).

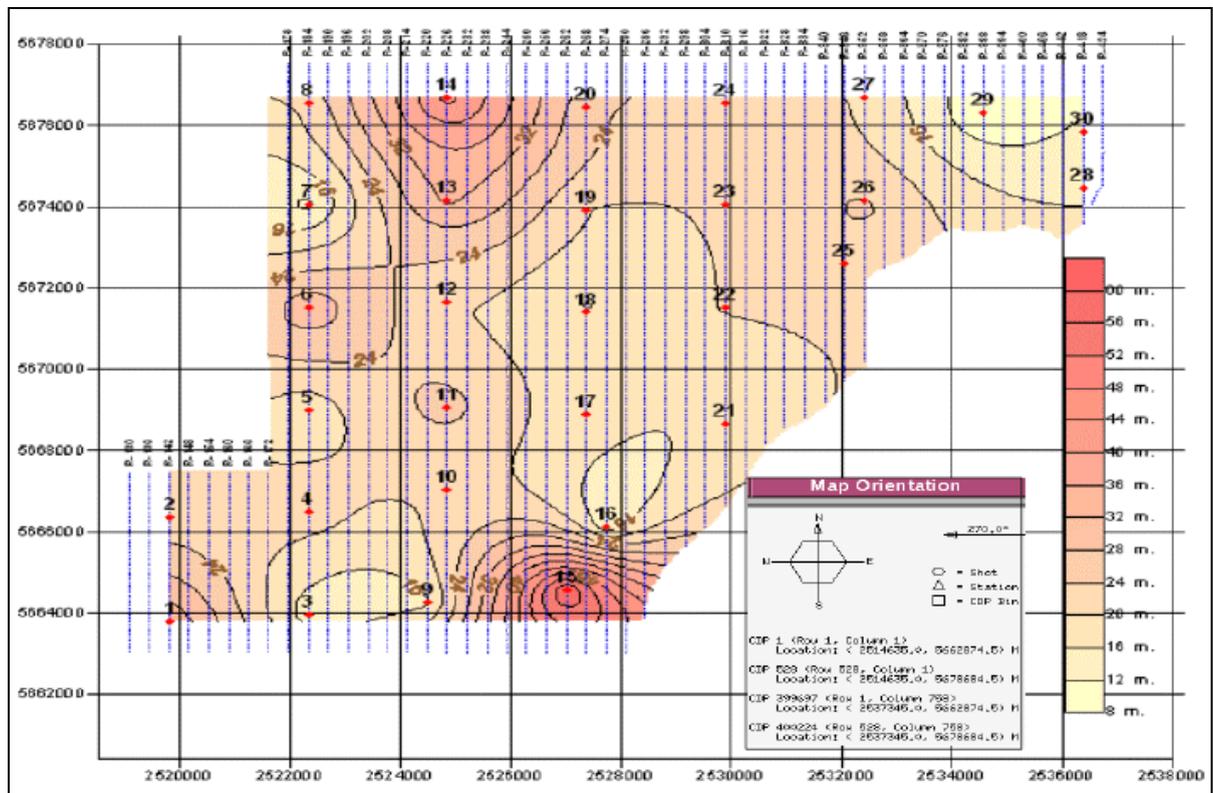


Figura 23. Mapa de espesores del weathering (extraído de Pionner Natural Resources, 2004).

6.2 Procesamiento de datos sísmicos

Una vez adquiridos los datos de campo, se realiza el procesamiento de los mismos. Consiste en la aplicación de correcciones y algoritmos matemáticos con el objetivo de mejorar la relación señal-ruido, la frecuencia y el enfoque; de esa manera se obtiene una imagen sísmica de alta calidad que se ajuste lo máximo posible a la geología de subsuelo.

Los ruidos acompañan en el registro a las reflexiones, que es la señal de interés. Estos ruidos pueden ser clasificados respecto a su origen como: ruidos que se originan en la fuente, en el medio, durante la registración y los que se producen durante el proceso de datos (Fig. 24).

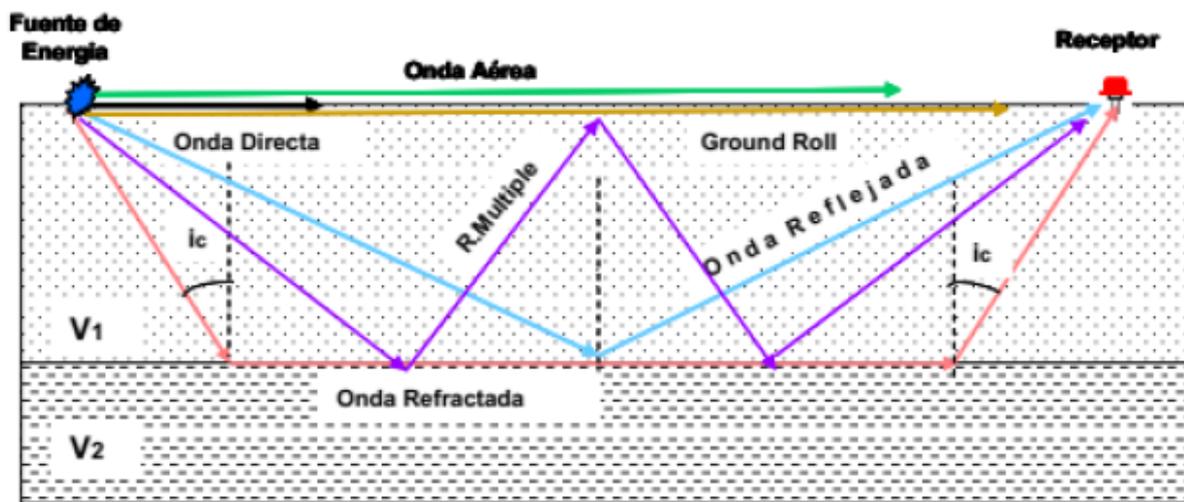


Figura 24. Esquema generalizado donde se detalla la reflexión en la interfase (señal de interés) y los diferentes ruidos en la adquisición del dato sísmico (Cátedra de Geofísica UNCo, 2021).

Las tres etapas principales del procesamiento son:

Correcciones Estáticas: Tiene por objetivo eliminar el efecto topográfico y de la capa meteorizada (*weathering*), para ello se refieren todos los datos a un plano imaginario (*datum*) ubicado por debajo del *weathering*. Para determinar el espesor y la velocidad de la capa meteorizada y del *subweathering* se utiliza el método de refracción sísmica o *up-hole*.

Una vez caracterizado el *weathering*, se selecciona el nivel del *datum* y se calculan los intervalos de tiempo que deberán corregirse para cada traza de la línea sísmica (Fig. 25).

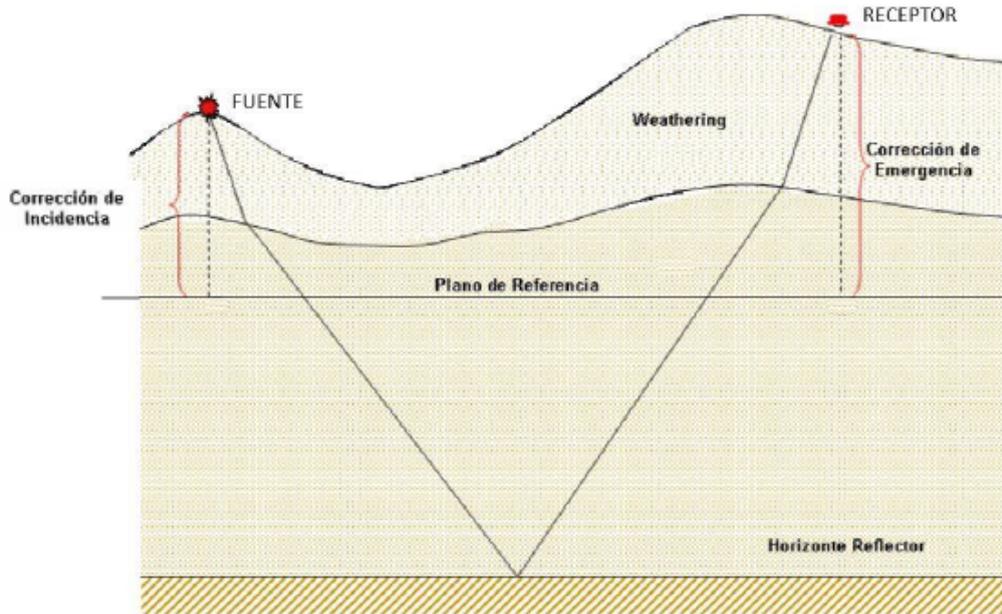


Figura 25. Esquema generalizado de correcciones estáticas (Cátedra de Geofísica UNCo, 2021).

Correcciones Dinámicas: Tiene por objetivo horizontalizar las hipérbolas de reflexión y colocar en fase las distintas reflexiones que provienen del mismo punto común profundo (PCP), agrupadas en un gather. Una vez realizada la corrección dinámica se realiza el *stacking* de la trazas: Se llevan todas las trazas al tiempo correspondiente a cada reflexión como si fuente y receptor estuvieran juntos (T_0) (Fig. 26), luego se suman todas las trazas obteniendo la traza suma. Este procedimiento tiene como objetivo mejorar la relación señal/ruido atenuando los ruidos aleatorios (ruidos ambientales) y las reflexiones múltiples.

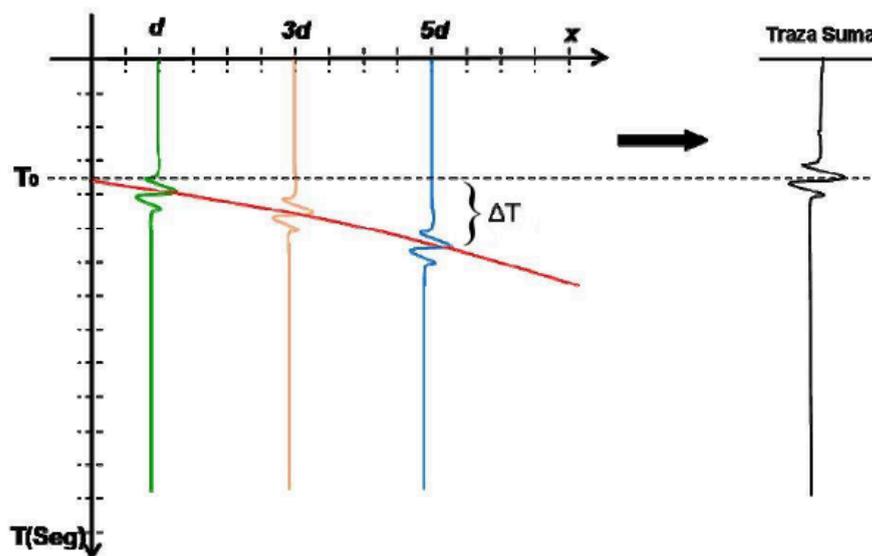


Figura 26. Esquema de corrección dinámica (Cátedra de Geofísica UNCo, 2021).

Migración: Proceso que se aplica para corregir las difracciones que se producen en una sección sísmica debido a un relieve brusco de algún reflector. El objetivo es reubicar esta energía a su verdadera posición, provocando el colapso de estas difracciones. Además, la migración ubica a todas las reflexiones en su verdadera posición.

6.2.1 Procesamiento del dato sísmico en el área de estudio

El procesamiento de datos se realizó en el centro de procesamiento de Veritas DGC Buenos Aires de julio a septiembre de 2004, utilizando para las correcciones estáticas un datum final de 900 msnm y una velocidad de reposición de 2800 m/s, que utilizó el método tomográfico.

Además se desarrolló la siguiente secuencia:

1. Reconversión de formato SEG-D al formato interno de VERITAS GeoServices.
2. Edición de Geometría, QC y Trace.
3. Corrección de divergencia esférica.
4. Atenuación de amplitud anómala.
5. Conversión de datos de Vibroseis a equivalente de fase mínima.
6. Deconvolución de picos consistentes en la superficie.
7. Upholes estáticos y refracciones estáticas de campo.
8. Análisis interactivo de primera velocidad.
9. Estática Residual Consistente en la Superficie del Primer Paso.
10. Análisis interactivo de segunda velocidad.
11. Estática Residual Consistente en la Superficie del Segundo Paso.
12. Balance espectral pre-stacking.
13. Estática de compensación.
14. Deconvolución FXY en dominio de dispersión cruzada.
15. Análisis de velocidad DMO y correcciones NMO.
16. Eliminación principal pre-stack.
17. Aplicación de correcciones DMO y DMO.
18. Deconvolución FXY.
19. Migración Omega-X.
20. Filtro de frecuencia de paso de banda.
21. Apilamiento principal

6.3 Interpretación del dato sísmico

6.3.1 Calibración sísmica-pozo

Una vez adquirido y procesado el cubo de datos sísmicos 3D, se procede con la interpretación. Esta etapa tiene como objetivo principal identificar los horizontes correspondientes a los niveles geológicos de interés mediante la relación del tiempo de la sísmica (microsegundos) con la profundidad (metros). La importancia de realizar una calibración radica en hallar una ley de velocidad para cada pozo que corresponde a la relación entre la información de los pases formacionales obtenida de los pozos (metros) y los tiempos de ida y vuelta (microsegundos) hacia los distintos reflectores observados en las secciones sísmicas (Fig. 27).

Existen 3 métodos para correlacionar los datos sísmicos con los de pozo:

- Integración del perfil sísmico
- Prueba de velocidad (*check-shot*)
- VSP (perfil sísmico vertical)

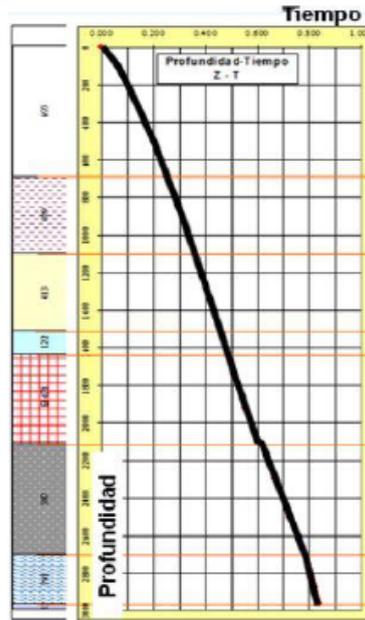


Figura 27. Esquema general de la ley de velocidad (Cátedra de Geofísica UNCo, 2021)

Integración del perfil sísmico

Consiste en registrar el tiempo de tránsito (Δt) que demora una onda acústica (onda mecánica compresional) en recorrer un pie de formación. El tiempo de tránsito es la inversa de la velocidad ya que, el primero relaciona tiempo/profundidad y la velocidad, profundidad/tiempo (ecuación 4).

$$V = 1/\Delta t \quad (4)$$

donde, V = velocidad y Δt = tiempo de tránsito

Dada la diferencia entre las unidades de ambas magnitudes, usualmente V se mide en m/s (metros/segundo) y el tiempo de tránsito en us/ft (microsegundos/pie), se introduce un factor de conversión de unidades a la fórmula anterior (ecuación 5).

$$V = 304.810 / \Delta t \quad (5)$$

El registro del perfil sísmico en conjunto con el de densidad, permiten obtener un perfil de impedancias acústicas, del cual se extraen los coeficientes de reflexión (ecuaciones 1 y 2). Posteriormente, estos coeficientes son convolucionados con una ondícula de características similares a la sísmica en el intervalo de interés para obtener una traza sintética o sismograma sintético, el cual se superpone con la sección sísmica para realizar la calibración del mismo (Fig. 28).

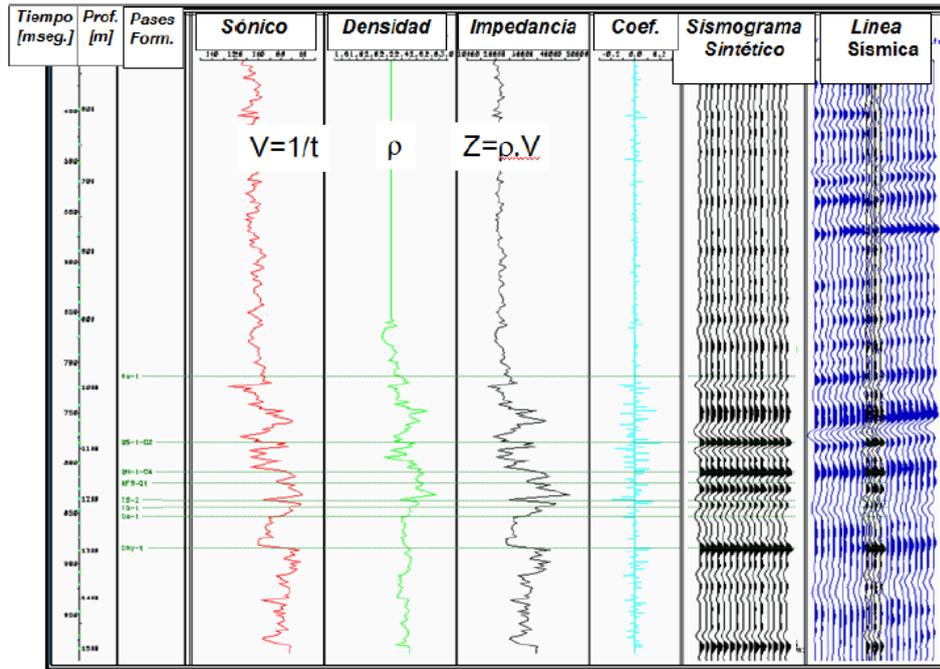


Figura 28. Procedimiento de obtención del sismograma sintético a partir del método de Integración del Perfil Sónico (Cátedra de Geofísica UNCo, 2021).

Prueba de Velocidad o *Check-shot*

Consiste en registrar el tiempo que demora un impulso sísmico, emitido desde superficie en la cercanía de la boca de pozo, en recorrer los estratos rocosos hasta ser registrados por los receptores ubicados dentro del pozo en las profundidades de interés o donde se registren cambios de velocidades. Para ello, se registra el tiempo de propagación de la onda directa. El tiempo medido, al ser registrado de manera oblicua respecto de la normal que pasa por los receptores, debe ser verticalizado para obtener un T_0 (tiempo de ida y vuelta) (Figura 29).

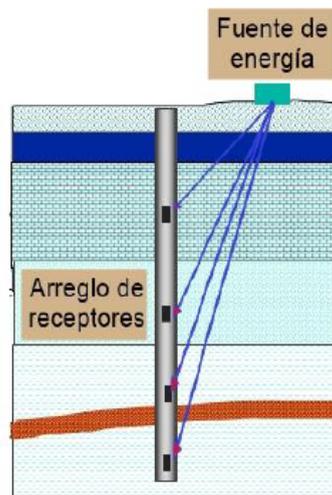


Figura 29. Diseño de adquisición de la Prueba de Velocidad (Cátedra de Geofísica UNCo, 2021).

Además de ser una ley de velocidad por sí misma, la prueba de velocidad se utiliza para la calibración del perfil sónico. El método clásico de calibración consiste en aplicarle al perfil acústico las correcciones indicadas por una curva de deriva (*drift*) obtenida a partir del análisis

de las diferencias entre los tiempos registrados mediante la Prueba de Velocidad, o *check-shot* y los tiempos integrados del perfil sísmico. Luego de aplicar dicha corrección se obtiene un sismograma sintético corregido.

La ventaja de este método es la utilización de una fuente de energía similar a la utilizada en la sísmica de reflexión, por lo tanto, los espectros de frecuencias de emisión serán similares.

VSP (Perfil Sísmico Vertical)

Este método es similar a la Prueba de Velocidad, en cuanto al diseño de adquisición, excepto que se registran los tiempos de arribo de las ondas directas y también de las ondas reflejadas (Fig. 30). El VSP utiliza la onda directa (D), como el *check-shot*, y las ondas reflejadas (U), que permiten obtener información por debajo del fondo del pozo. El tiempo total de ida y vuelta (T_0) para cada reflexión se obtiene de sumar los tiempos de las ondas directas y el de las reflejadas, para cada posición: (D + U), luego de verticalizar las trayectorias.

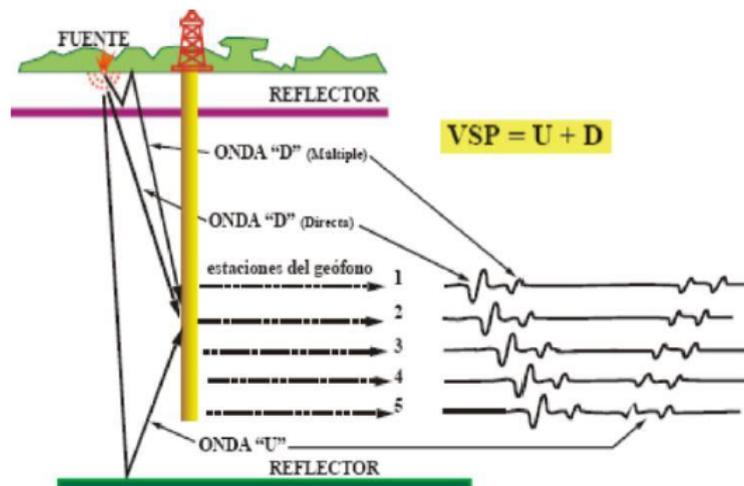


Figura 30. Esquema registraci3n VSP (C3tedra de Geofisica UNCo, 2021).

Las estaciones receptoras se colocan equiespaciadas en el pozo, cada 15 a 30 m, cubriendo el tramo de mayor inter3s. Se registran al menos 40 estaciones y se completa el resto del pozo registrando otras posiciones con el mismo criterio de la Prueba de Velocidad.

Luego, del VSP se obtiene como resultado final, una sola traza suma que representa, en ese intervalo, la respuesta s3smica de la columna sedimentaria en la posici3n del pozo (Fig. 31). Con esta t3cnica se puede correlacionar con precisi3n cada rasgo de la traza s3smica del VSP.

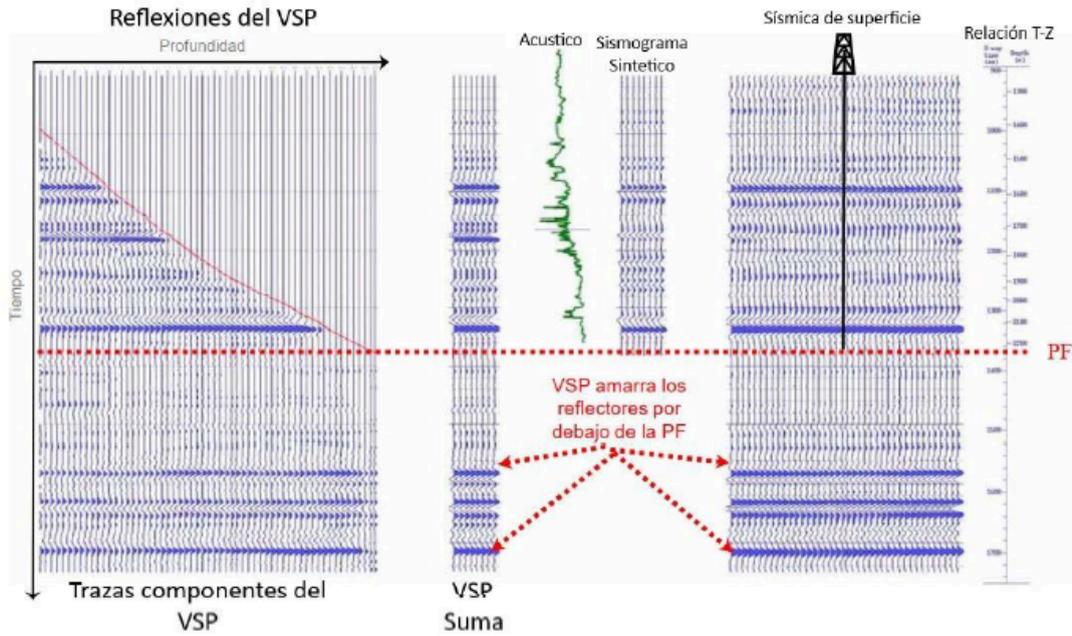


Figura 31. VSP, Sismograma Sintético y Sísmica de superficie (Cátedra de Geofísica UNCo, 2021).

6.3.2 Resolución sísmica

Al momento de realizar la interpretación de datos sísmicos de un área en particular, es primordial llevar a cabo el cálculo de la resolución sísmica, tanto vertical como lateral. La resolución sísmica se refiere a cuál es el menor detalle que podrá ser discriminado a través del dato sísmico. El poder de resolución de la sísmica, se vincula a la longitud de onda (Fig. 32), la cual está en relación con la velocidad de las rocas y frecuencia predominante del dato sísmico.

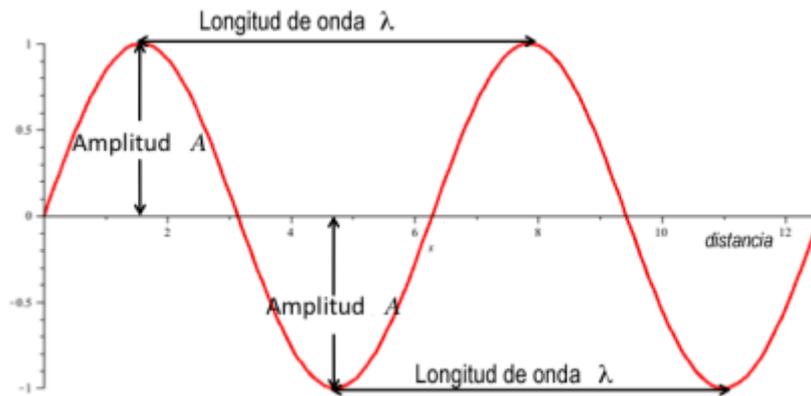


Figura 32. Longitud de onda.

En promedio, la velocidad de las rocas incrementa con la profundidad, ya que éstas aumentan su compactación. Por otro lado, la frecuencia predominante decrece con la profundidad debido a que las altas frecuencias de la señal sísmica son absorbidas o atenuadas a medida que se propagan por las diferentes capas del subsuelo.

Lo mencionado conlleva a que el valor de la longitud de onda aumente significativamente con la profundidad (ecuación 6), empeorando la resolución vertical y lateral a medida que aumenta la profundidad.

$$\lambda = v/F (6)$$

donde λ es la longitud de onda, v es la velocidad de las rocas y F es la frecuencia.

A la hora de determinar la resolución sísmica, se detallan 2 parámetros de interés:

Resolución Vertical

Es el espesor mínimo de una capa, en la cual las reflexiones provenientes de su tope y de su base pueden ser distinguidas y que refleja el espesor real de las capas. El valor depende del criterio que se utilice para definirlo. El criterio de Rayleigh establece que el límite de resolución vertical es de un $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda dominante (Kallweit y Wood, 1982) (ecuación 7).

$$RV = \lambda /4 = v/4F (7)$$

donde v es la velocidad de las rocas y F es la frecuencia.

Resolución Horizontal o lateral

Está directamente relacionada con el radio de Fresnel (Sheriff, 1985) y corresponde a la mínima separación lateral de objetos que podrán ser discriminados (ecuación 8).

$$RL = v \sqrt{t}/f (8)$$

Donde t : tiempo simple; v : velocidad promedio; f : frecuencia

Con el objetivo de mejorar el valor de resolución se pueden aplicar diferentes metodologías, como es el caso de la migración (ecuación 9). En general, luego del proceso de migración el valor de la resolución horizontal puede acercarse al de la resolución vertical. Sin embargo, la resolución lateral difícilmente pueda ser alcanzada en la práctica debido a que se requiere de una migración perfecta para lograrla. En general la resolución lateral está dada por:

$$\text{Resolución lateral post - migración: } \lambda/2 (9)$$

donde λ corresponde a la longitud de onda.

6.3.3 Atributos sísmicos

Los atributos sísmicos, son aquellos parámetros que se pueden extraer matemáticamente de la traza sísmica (considerando a la misma como una traza compleja) y que de alguna manera caracterizan a las rocas o la interfase entre dos capas. La extracción de estos atributos en un dato sísmico, permite su visualización en secciones sísmicas o a través de una vista en planta, con el objetivo de poder detectar variaciones en las propiedades y/o características de las rocas a lo largo del dato sísmico.

Los atributos intérprete-independientes, son los que se calculan en el dato sísmico, sin tener en cuenta la interpretación ni el modelo geológico. Es decir, que son independientes de la interpretación realizada en el dato sísmico.

Los atributos intérprete-dependiente se calculan luego de realizar una interpretación sísmica, por lo tanto, dependen de ellas. Una vez interpretado un nivel de interés, se realiza la extracción de los atributos sísmicos, guiando la extracción en el entorno del dato interpretado. La extracción del atributo puede realizarse en el tiempo (tiempo sísmico) exacto de la superficie interpretada, en un entorno de una determinada cantidad de milisegundos por encima y por debajo de la superficie interpretada, o también puede realizarse entre 2 superficies interpretadas.

En el presente estudio, se utilizaron los siguientes atributos con el objetivo de mejorar el análisis dentro del área de estudio:

Atributos de amplitud

El valor de la amplitud de una reflexión es proporcional al valor del coeficiente de reflexión, por lo tanto está relacionado con las características de las rocas que están por encima y por debajo de la interfase y de la relación entre ellas. A mayor contraste entre impedancias acústicas de las rocas (ecuaciones 1 y 2), mayor será el valor de la amplitud, ya sea positivo o negativo. Las variaciones de amplitud permiten identificar y vincular zonas con importantes contrastes de impedancia acústica de las rocas, lo cual responde al cambio de la velocidad y densidad de éstas (características litológicas, fluidos, variaciones laterales de facies, etc).

Atributos de discontinuidad

Los atributos de discontinuidad sísmica se vinculan principalmente a la presencia de fallas o fracturas. La visualización en secciones verticales y horizontales en tiempo constante (*time slices*) permite detectar trenes de fallas con mayor o menor grado de incertidumbre en función de los parámetros de adquisición o procesamiento del dato sísmico. Los atributos de discontinuidad calculados en este estudio, *similarity* y *pseudo relief*, se fundamentan en la comparación de las trazas sumas cercanas para asignarles un valor de cero cuando son iguales y un valor de uno cuando son diferentes. Esto permite obtener una visualización con mayor detalle de los rasgos estructurales y/o discontinuidades presentes en el dato sísmico con un color negro, mientras que en color blanco se establecen aquellos sectores con trazas sumas iguales. El atributo *similarity* es equivalente a los atributos de coherencia, varianza o semblanza según el software utilizado, mientras que el atributo *pseudo relief* puede compararse con el atributo de discontinuidad *Tec-Va*, en el que se obtiene una imagen de relieve que realza las discontinuidades (Fig. 33).

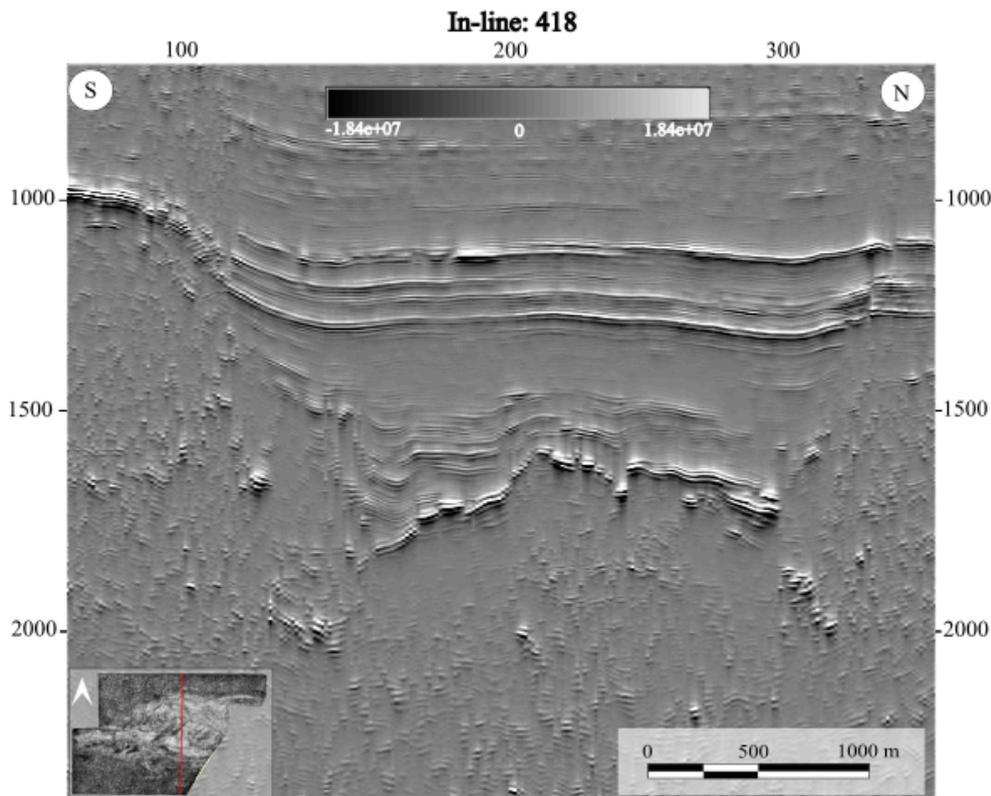


Figura 33. Sección sísmica en sentido N-S con el uso del atributo *pseudo relief*, el cual permite identificar rasgos estructurales y discontinuidades en el dato sísmico.

6.4 Registros de pozos

Para la interpretación del basamento de la Cuenca Neuquina y de las secuencias sedimentarias suprayacentes se utilizaron diferentes registros los cuales sirvieron para determinar y describir los parámetros físicos relacionados a las propiedades geológicas y petrofísicas de las unidades presentes en el subsuelo. Los perfiles utilizados en el presente estudio se describen a continuación.

Rayos Gamma (*Gamma Ray* = GR)

Se basa en la medición de las emisiones naturales de rayos gamma que poseen las rocas. Debido a que los principales elementos radioactivos (K, Th, U) tienden a concentrarse en arcillas y lutitas, este registro permite distinguir este tipo de litologías identificadas por valores altos en el registro de rayos gamma, mientras que los valores bajos estarían asociados a otras litologías sin presencia de U, K y Th, como es el caso de las arenas limpias o carbonatos. Como regla general se puede decir que mientras mayor es el contenido de arcilla de las rocas mayor es la emisión de GR de las mismas. La unidad de medida es en grados API, con un rango de valores que generalmente va de 0 a 150 API.

Registro de Densidad

Se basa en la medición de la densidad de la formación, por medio de la atenuación de rayos gamma entre una fuente y un receptor. Posee una fuente de rayos gamma, los cuales colisionan con los átomos presentes en la roca. La herramienta también posee un receptor que mide los

rayos gamma dispersos liberados en las colisiones, asociadas al efecto Compton que se produce en la roca, Las características de estos rayos varían en relación con la densidad de electrones libres en la roca, el cual está relacionado con la densidad de la misma. Sirve para estimar la densidad del sistema roca – fluido que posteriormente servirá para calcular la porosidad por densidad. Si el registro de densidad es bajo indica alta porosidad y si es alto indica baja porosidad. La unidad de medida es gr/cm^3 , con un rango de valores que va desde 2 a $3 \text{ gr}/\text{cm}^3$ aproximadamente.

Registros Sínicos

Utiliza el mismo principio del método sísmico: mide la velocidad del sonido en las ondas que recorren una trayectoria por las rocas, en las cercanías del pozo. Posee un emisor de ondas y un receptor. Se mide el tiempo de tránsito de dichas ondas en una distancia conocida. También este perfil permite calcular la porosidad de las rocas penetradas por el pozo a partir del tiempo de tránsito de las ondas. Mientras mayor es el tiempo de tránsito, menor es la velocidad, y por lo tanto, mayor es la porosidad de la roca (generalmente). La unidad de medida es $\mu\text{seg}/\text{m}$ (100 – 500) ó $\mu\text{seg}/\text{pie}$ (40 – 140), para las ondas P.

Resistividad (*Resistivity*)

Es la capacidad que tienen las rocas de oponerse al paso de corriente eléctrica inducida y es el inverso de la conductividad. Es una propiedad dependiente, en gran parte, de la sal disuelta en los fluidos presentes en los poros de las rocas y proporciona evidencias del contenido de fluidos en ellas. Si los poros de una formación contienen agua salada presentará alta conductividad y por lo tanto la resistividad será baja, pero si están llenos de petróleo o gas presentará baja conductividad y por lo tanto la resistividad será alta.

7. DESARROLLO

7.1 Metodología

Para la elaboración del presente estudio se llevó a cabo el flujo de trabajo que se detalla en la Fig. 34. El mismo consiste, en primera instancia, en la recopilación y análisis preliminar de la información de la Cuenca Neuquina, priorizando los estudios en el ámbito de la Dorsal de Huincul y en el depocentro de Picún Leufú (Pángaro *et al.*, 2005; Mosquera *et al.*, 2006; Ramos *et al.*, 2011 y Sigismondi, 2013) y antecedentes de los sistemas petroleros relacionados al ámbito de la Dorsal de Huincul (Pángaro *et al.*, 2005; Villar *et al.*, 2005 y Legarreta *et al.*, 2008).

Realizado el análisis bibliográfico, se procedió con la carga de datos (sísmica y pozos) en el software *Opentect* con la revisión y el análisis de la información de los legajos de los pozos facilitados por la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén, destacando los informes finales de cada pozo, descripciones de *cutting*, perfiles eléctricos (sónico, densidad, rayos gamma, resistividad) e informes de procesamiento del volumen sísmico Ojo de Agua 3D.

Seleccionados los pozos con la información necesaria, se realizó la correlación de los pozos con el dato sísmico. Con los datos obtenidos se logró determinar la fase del volumen sísmico,

para luego interpretar los reflectores sísmicos que corresponden a los horizontes de interés y las fallas/discontinuidades. Posteriormente, se elaboraron mapas isócronos e isocronopáquicos, priorizando rasgos estratigráficos y/o estructurales vinculados al basamento de la cuenca. Finalmente se estableció un modelo geológico para el área Ojo de Agua.

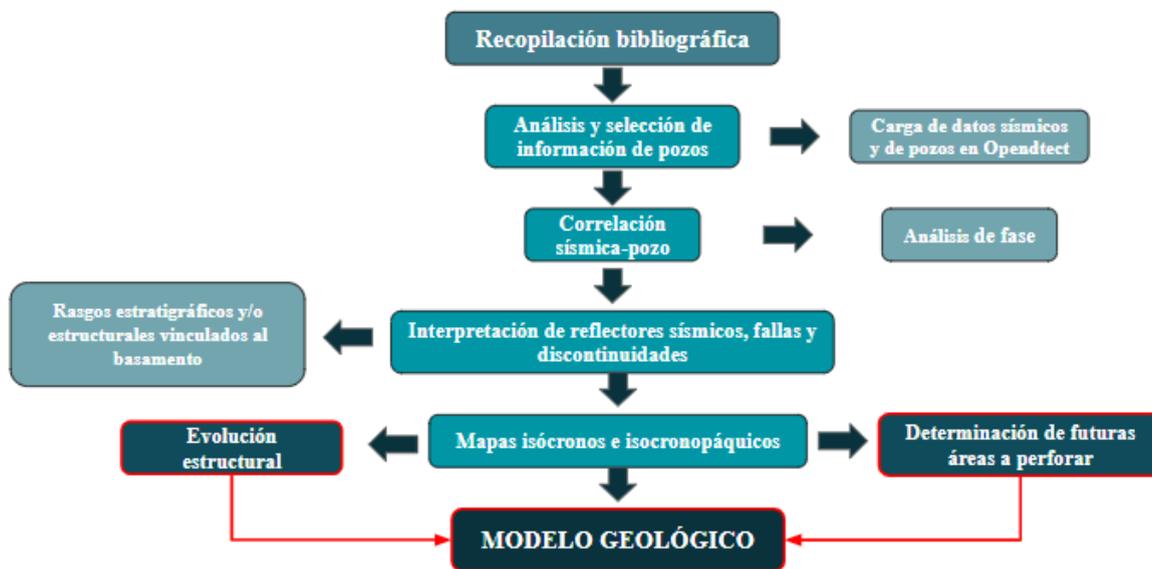


Figura 34. Flujo de trabajo realizado en el presente estudio.

7.2 Carga de datos en software OpendTect

La carga de datos comenzó con información de 24 pozos otorgados por la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos, los cuales fueron analizados para discriminar aquellos que no contaran con la información requerida para el estudio. Para esto, se elaboró una tabla (tabla 3) con los siguientes datos: nombre del pozo, coordenadas, sistema de referencia y lectura de los perfiles eléctricos y el contenido de perfiles de densidad, *gamma ray* y *caliper*.

Pozos											
Nombre	Coordenadas		Sistema de referencia	Perfiles							
				DT(μs/ft)		Densidad (g/cm³)		GR (°API)		CAL	
	X	Y		Inicio (mbbp)	Final (mbbp)	Inicio (mbbp)	Final (mbbp)	Inicio (mbbp)	Final (mbbp)	Inicio (mbbp)	Final (mbbp)
PVO.x-2001	5,677,329.26	2,528,261.35	Sistema Posgar 94	377	1294	977	1365	977	1365	977	1365
DHE. x-1 (Dos Hermanas Este)	5,669,322.72	2,520,456.33	Campo Inchauspe 69	0	1505	0	1505	0	1505	0	1505
NQ. a-1020 (Divisadero General San Martín)	5,676,018.15	2,519,170.64	Campo Inchauspe 69	358	1000	358	1600	358	1600	358	1600
NQ a-1021 (Divisadero Gral. San Martín)	5,674,472.33	2,511,573.24	Campo Inchauspe 69	333.5	1189	333.5	1600	333.5	1600	333.5	1600
NQ-1034 (Divisadero Gral. San Martín)	5,675,559.42	2,518,869.76	Campo Inchauspe 69	492	1300	650	1300	492	1300	492	1300

NQ-1040 (Divisadero General San Martín)	5,677,437.64	2,518,652.10	Campo Inchauspe 69	350	1301.5	900	1301.5	350	1301.5	-	-
OdA.x-1 (Ojo de Agua)	5,669,178.94	2,522,309.33	Campo Inchauspe 69	352	2205	1200	2205	0	2205	0	2205
OA.x-2 (Ojo de Agua)	5,708,000.00	2,430,050.00	-	246.5	2624.5	550	2625	550	2625	-	-
ALN-1(Arroyo La Noria x-1)	5,677,477.09	2,537,044.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lfa.x-1 (Loma Farias x-1)	5,666,151.74	2,521,298.63	Gauss-Kruggen	-	-	-	-	-	-	-	-
Me.x-2 (Mellao 2)	5,668,657.00	2,530,510.00	-	524	1932	-	-	524	1932	-	-
Me-1 (Mellao 1)	5,670,517.73	2,528,711.73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NQ.a-32	5,672,540.50	2,518,102.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NQ.a-33	5,674,441.92	2,518,956.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NQ.a-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NQ.a-39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NQ.a-40	5,671,918.50	2,518,134.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NQ.a-41	5,674,719.48	2,518,267.57	Gauss-Kruggen	-	-	-	-	-	-	-	-
NQ.x-31	5,673,482.70	2,518,965.03	Gauss-Kruggen	-	-	-	-	-	-	-	-
NQ.x-49	5,674,511.21	2,521,384.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NX-39	5,676,341.84	2,526,210.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PV.x-4	5,677,376.00	2,530,305.00	-	-	-	-	-	500	1309	500	1309
Pv.x-5	5,676,550.00	2,530,500.00	-	-	-	-	-	484	1415	484	1415

Referencias	
	Pozos con perfiles en niveles de interés
	Pozo fuera del área de estudio.
	Pozos sin perfiles y/o sin legajos con coordenadas.
	Pozos sin perfil sísmico.

Tabla 3. Datos de pozos.

Luego de este proceso, seis pozos fueron seleccionados y cargados en el software *Opendtect* considerando a aquellos que brindaran información del basamento de la cuenca y a su vez fueran productivos de petróleo y/o gas. Para esto se elaboró una nueva tabla detallando los pases formacionales de los pozos seleccionados y observaciones de producción de los niveles de interés (tabla 4).

Pases formacionales											
Pozo	Gr. Neuquén	Fm. Bajada Colorada	Fm. Centenario	Fm. Mulichinco	Fm. Quintuco	Fm. Vaca Muerta	Fm. Qda. del Sapo	Gr. Cuyo	Precuyo	Basamento	Prof. Final
PVO.x-2001	381	-	422	876	1002	1127	1217	1228	-	-	1365
NQ.a-1020	-	0	813	-	963	1099	1192	1202	1526	-	1600
NQ.a-1021	0	356	810	-	938	1091	1184	1209	1528	-	1602

NQ-1034	-	495	824	-	967	1120	1198	1209	-	-	1300
NQ-1040	-	500	812	-	957	1108	1188	1198	-	-	1300
Me.x-2	0	-	410	-	922	-	1250	1277	-	1849	1945
Referencias											
	Petróleo										
	Rastros aislados de Hc										

Tabla 4. Pases formacionales de los pozos cargados al *software* libre *Opentect*.

En la Fig. 35 se detallan los pozos que se encuentran dentro del área de estudio. En color rojo se destacan aquellos que cuentan con la información necesaria para ser correlacionados con la sísmica y en color azul, aquellos que no contaron con la información de interés para el estudio. Para el caso del pozo Me.x-2 se confeccionó un perfil de densidad constante con un valor de densidad de 2,43 gr/cm³.

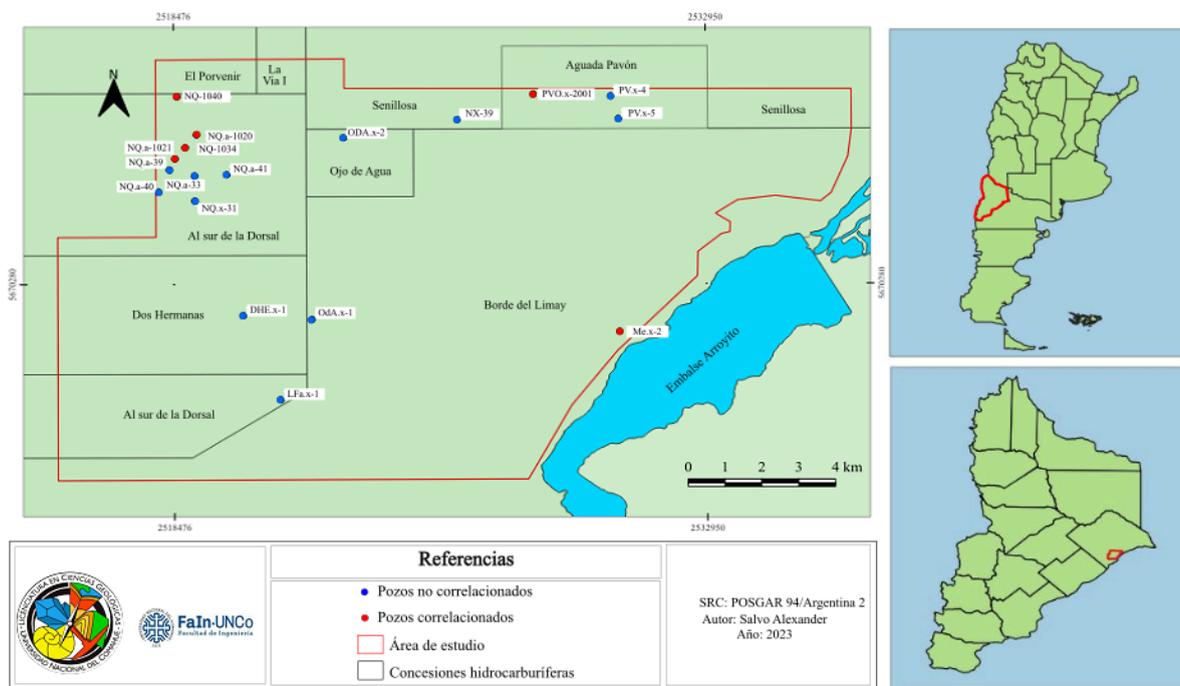


Figura 35. Ubicación de pozos correlacionados (color rojo) y no correlacionados (color azul) en el área de estudio. En el recuadro de color rojo se destaca el área de estudio.

7.3 Correlación sísmica-pozo y análisis de fase

Una vez obtenidos los datos de los pozos con la información de interés para la interpretación, se llevó a cabo su correlación con el dato sísmico. Para esto se utilizó el método de Integración del perfil sísmico.

En primera instancia, se procedió a la identificación e interpretación del reflector sísmico correspondiente al tope de la Fm. Quebrada del Sapo. Esta interfase fue posible de diferenciar debido al gran contraste de impedancias acústicas existente entre dicha unidad y las facies finas de la Fm. Vaca Muerta, además, se identificaron en el dato sísmico los niveles progradantes de la Fm. Vaca Muerta que se encuentran suprayacentes a esta interfase (Fig. 36). Luego, este horizonte fue utilizado para efectuar la corrección por *drift* al sismograma sintético obtenido

por el método de integración del perfil sísmico, ante la ausencia de registros de *check-shots* en los pozos utilizados.

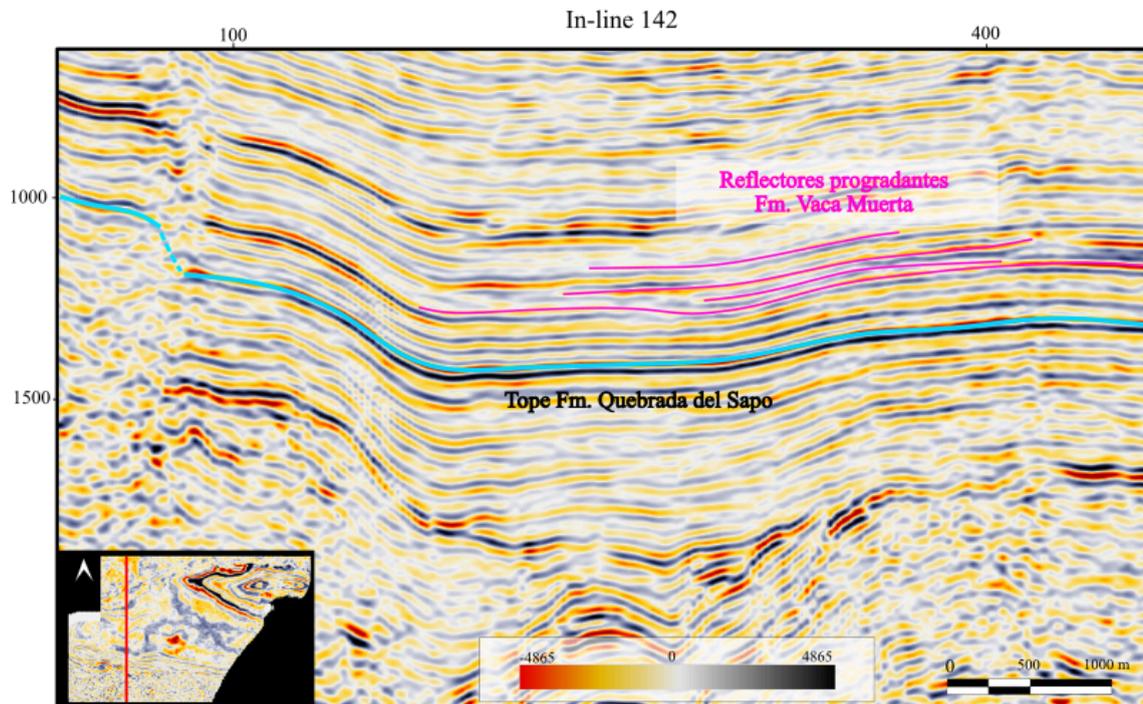


Figura 36. Sección sísmica N-S con el reflector sísmico interpretado correspondiente al tope de la Fm. Quebrada del Sapo. En flechas de color violeta se resaltan los reflectores progradantes de la Fm. Vaca Muerta.

Para lograr la correlación de cada pozo con la sísmica, fue seleccionada una ondícula con características similares al dato sísmico. Esto se logró realizando una extracción de ondícula en las cercanías del pozo, en un intervalo de tiempo de ida y vuelta en la zona de interés (900-1300 ms) y un área delimitada por 10 secciones sísmicas *cross-lines* e *in-lines* anteriores y 10 posteriores a la ubicación del pozo. De esta manera la extracción de la ondícula quedó comprendida por los intervalos de secciones sísmicas establecidos y por el intervalo de tiempo seleccionado.

A partir de los perfiles sísmicos y de densidad de los diferentes pozos a correlacionar, se obtuvo el perfil de impedancias acústicas (Fig. 37). Estos datos se utilizaron para aplicar el proceso matemático de convolución con la ondícula extraída y de esta manera obtener el sismograma sintético.

La correlación del sismograma sintético con el dato sísmico en la ubicación del pozo se logró a través de aplicar la corrección por deriva o *drift*. Esto tiene como principal objetivo ajustar de forma eficaz el sismograma sintético obtenido previamente con la sísmica. En la Fig. 37 se observa que el tope de la Fm Quebrada del Sapo se correlaciona con un reflector de polaridad negativa.

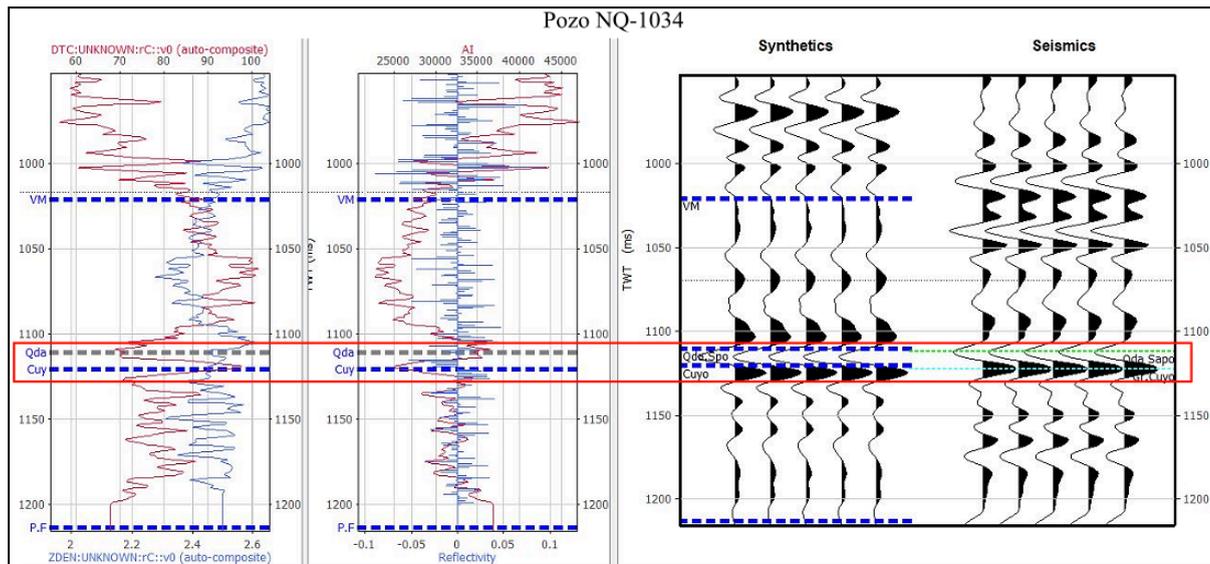


Figura 37. Proceso de correlación entre el sismograma sintético correspondiente al pozo NQ-1034 y el dato sísmico. Se observan de izquierda a derecha los perfiles sónico (rojo) y densidad (azul) en el primer track . El segundo track corresponde al perfil de impedancia acústica (rojo) y coeficientes de reflexión (azul) y en el tercer track, se visualiza el sismograma sintético con el dato sísmico en la posición del pozo. En el recuadro de color rojo se señala la correlación del tope de la Fm. Quebrada del Sapo con un reflector de polaridad negativa en el dato sísmico.

En los 6 pozos correlacionados, se obtuvieron coeficientes de correlación entre 45 y 75%. El análisis de fase de las ondículas utilizadas para la correlación de los pozos permitió establecer que el dato sísmico posee una fase entre 135 y -90 y una frecuencia entre 20 y 80 Hz (Fig. 38). Las ondículas extraídas de los pozos correlacionados se ilustran en el apartado 11.

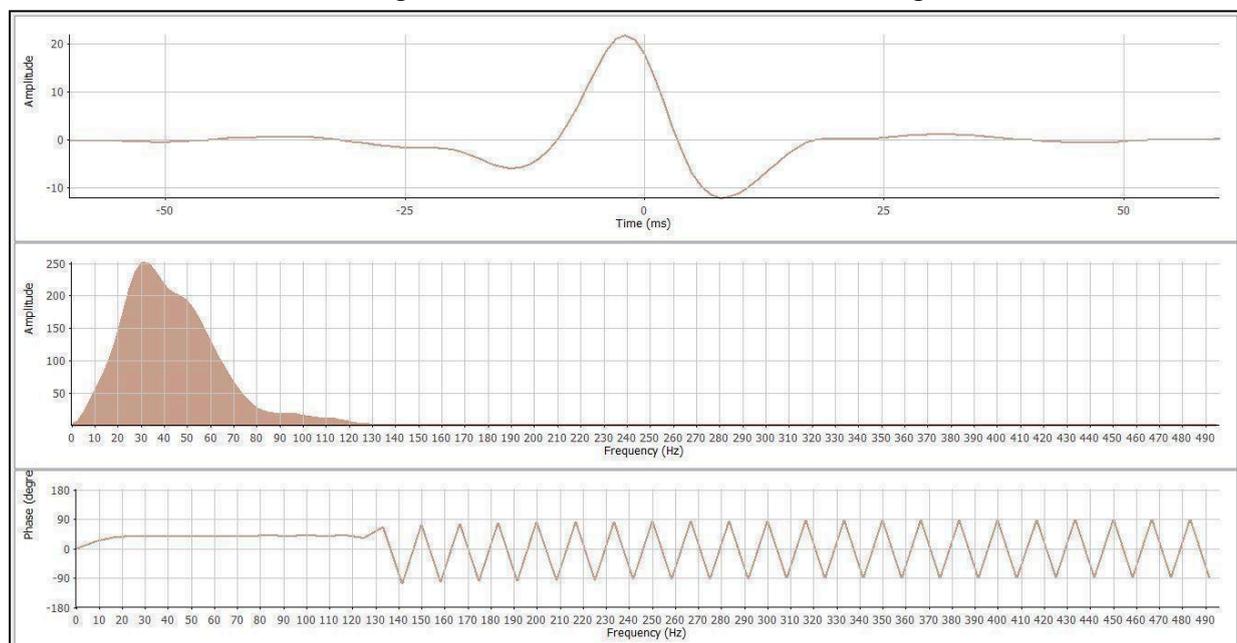


Figura 38. Fase y frecuencia de la ondícula correspondiente al pozo NQ-1034 luego de su correlación.

En la tabla 5 se adjuntan los valores obtenidos de coeficientes de correlación, fases y espectro de frecuencias para los pozos correlacionados. En promedio, la fase del dato sísmico

se encuentra cercana a un valor de 135 grados, sin embargo, es importante destacar que la correlación de los distintos pozos demostró que la fase del dato sísmico varía notablemente.

Pozo	Fase	Espectro de frecuencias (Hz)	Coefficiente de correlación (%)	Intervalo de correlación (ms)
PVO.x-2001	45	20-80	45	800-1300
NQ-1034	45	20-80	49	800-1200
NQ-1040	135	20-80	47	800-1200
NQ-1020	-90	20-80	75	1000-1300
NQ-1021	90	20-80	49	1000-1300
Me.x-2	-90	20-80	59	950-1500
Promedio de fases	135			

Tabla 5. Valores de frecuencias, coeficientes de correlación y fase de los pozos correlacionados con la sísmica en el área de estudio.

En la Fig. 39 se observa que el tope de la Quebrada del Sapo se correlaciona con un reflector de polaridad negativa en 4 de los pozos que fueron correlacionados.

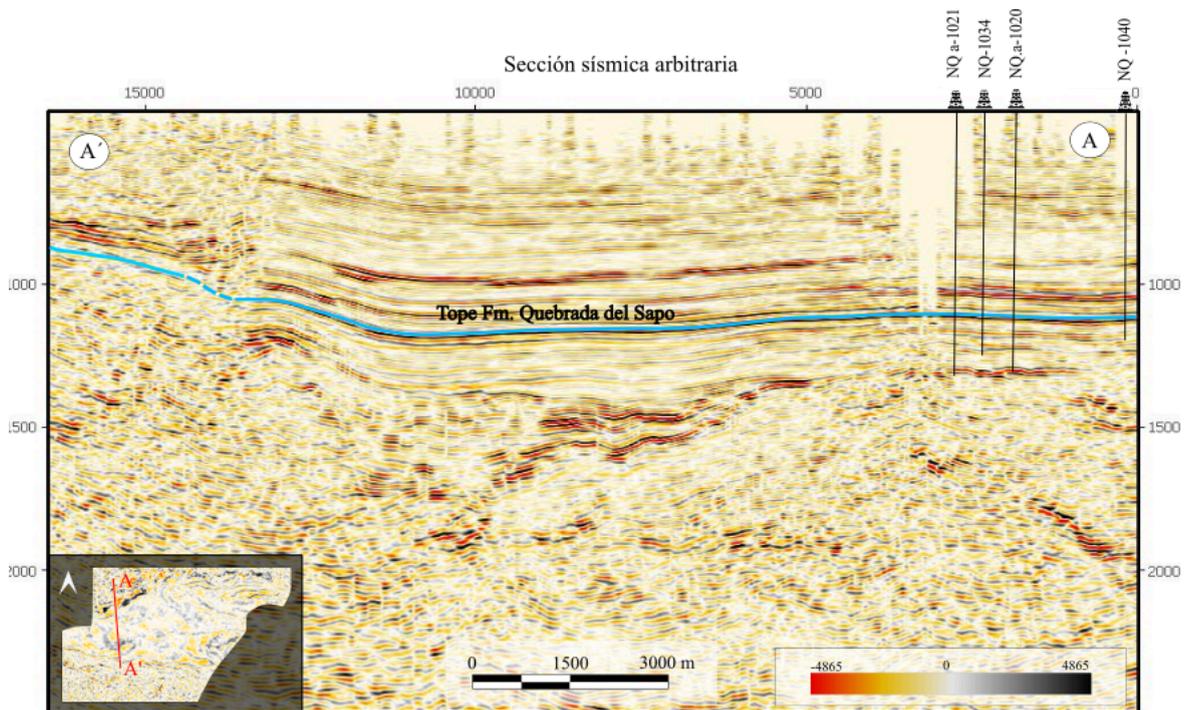


Figura 39. Sección sísmica arbitraria detallando 4 de los pozos que fueron correlacionados. En color celeste se destaca el reflector interpretado correspondiente al tope de la Fm. Quebrada del Sapo.

7.4 Cálculo de resolución sísmica

Para conocer la resolución sísmica en el área de estudio se seleccionaron dos pozos. El primer pozo seleccionado, Me.x-2, se encuentra ubicado en el extremo sureste del área de estudio. Fue seleccionado debido a que presenta el mayor registro de toda la columna sedimentaria del área de estudio, incluyendo parte del basamento de la cuenca. El segundo de

los pozos seleccionados corresponde al denominado NQ-1034 ubicado en el extremo noroeste del volumen sísmico, el cual presenta registros de las Fms. Quintuco, Quebrada del Sapo y Gr. Cuyo que son de interés hidrocarburífero. El cálculo se realizó en 2 intervalos para el pozo Me.x-2, uno albergando las unidades de las Fms. Quintuco y Quebrada del Sapo (1000-1200 ms) y el restante de mayor profundidad (1300-1500 ms) (Fig. 40). En la posición del pozo NQ-1034 se calculó solamente para un intervalo somero, es decir, de menor profundidad debido a su acotado registro (Fig. 41). Los datos utilizados se detallan en la tabla 6.

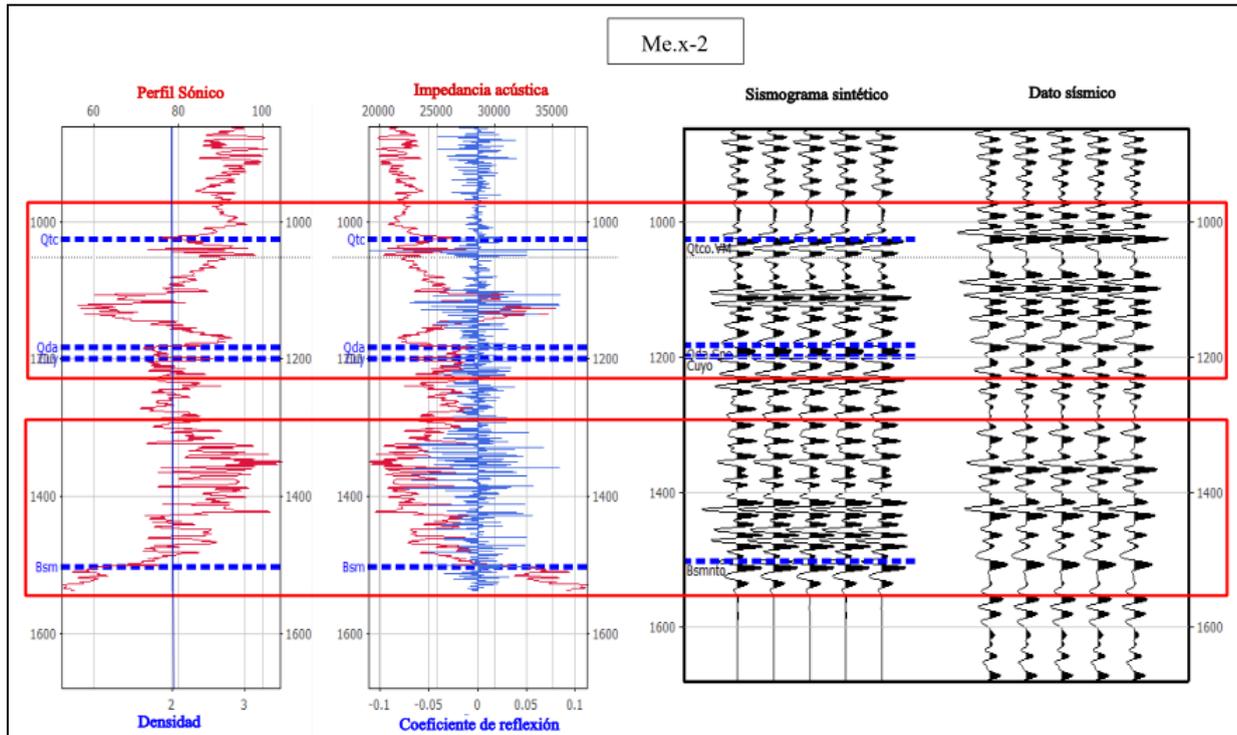


Figura 40. Intervalos utilizados para el cálculo de resolución vertical y horizontal del dato sísmico (recuadro de color rojo) en el pozo Me.x-2.

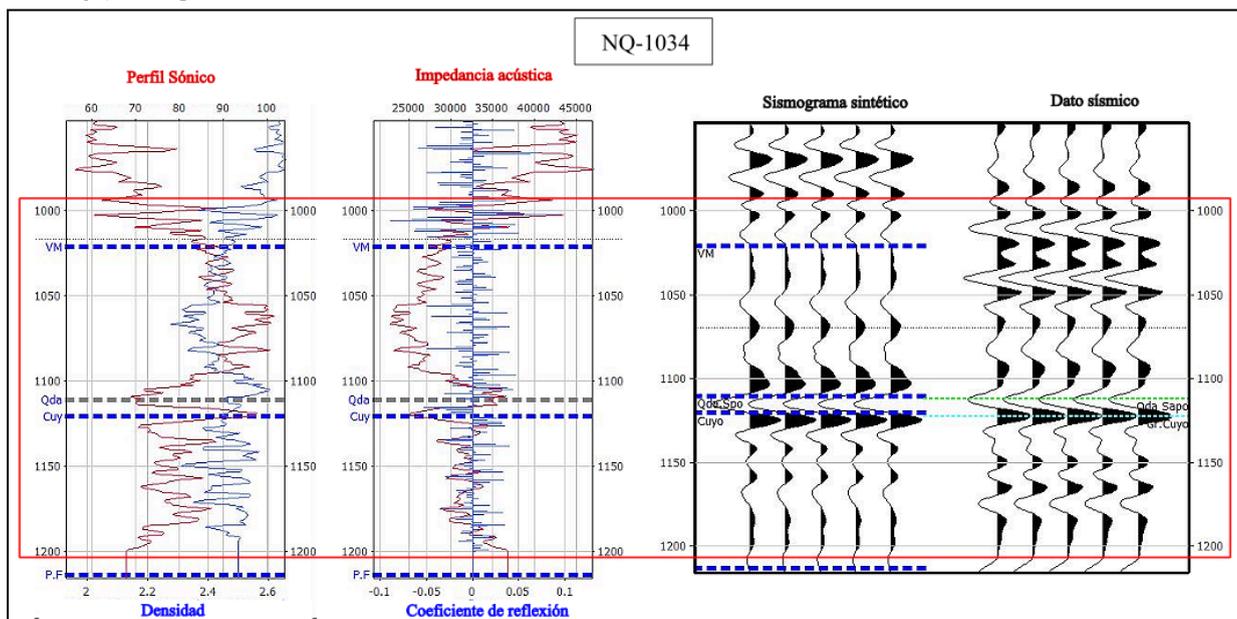


Figura 41. Intervalos utilizados para el cálculo de resolución vertical y horizontal del dato sísmico (recuadro de color rojo) en el pozo NQ-1034.

Con el análisis realizado, se logró visualizar que la resolución, tanto vertical como horizontal, se ve afectada con la profundidad debido a que se atenúan las altas frecuencias y aumenta la velocidad de propagación de las ondas acústicas en las rocas. Para los sectores someros de ambos pozos las resoluciones verticales se encuentran entre 17 y 18 m, mientras que las resoluciones horizontales se centralizan entre 35 y 36 m. Esto permite determinar que los espesores que se encuentren por debajo de la resolución vertical (menores a 17 m) no podrán ser detectados con claridad en los niveles correspondientes a Quintuco, Quebrada del Sapo y Gr. Cuyo. mientras que para los niveles profundos (Precuyo y basamento), este valor es aún mayor, por lo tanto, no podrán ser detectados niveles con espesores menores a 20 m.

Pozo	Me.x-2		NQ-1034 *
	Somera	Profunda	Somera
Profundidad	1000-1200	1300-1500	1000-1200
Tiempo (ms)	3901	4126	3975.5
Velocidad (m/s)	55	50	55
Frecuencia (Hz)	17.73	20.63	18.07
Resolución Vertical (m)	35.46	41.26	36.14
Resolución Horizontal (m)			

Tabla 6. Parámetros para el cálculo de la resolución vertical y horizontal. *El pozo NQ-1034 no cuenta con registros mayores a 1300 m de profundidad.

7.5 Interpretación

7.5.1 Interpretación de reflectores sísmicos

Si bien el principal nivel de interés en el presente estudio se atribuye al basamento cristalino de la cuenca, la interpretación inició con aquellos horizontes con mejores propiedades y rasgos sísmicos como es la alta amplitud y la continuidad lateral dentro del dato sísmico. Con esto mencionado se decidió interpretar, en primera instancia, los topes formacionales correspondientes a las Fms. Quebrada del Sapo, Quintuco y Gr. Cuyo, utilizando los seis pozos correlacionados previamente. Estos horizontes son de principal interés hidrocarburífero en el área de estudio debido a que constituyen los principales reservorios en el distrito Sur Dorsal.

Identificados los niveles en todos los pozos, fueron interpretados en todo el dato sísmico siguiendo una grilla de 40 *inline* por 40 *crossline* (Fig. 42). En aquellos sectores de mayor complejidad estructural y/o estratigráfica se decidió utilizar un grillado conformado de 5 *inline* por 5 *crossline* y en casos de extrema dificultad se hizo de 2 *inline* por 2 *crossline*.

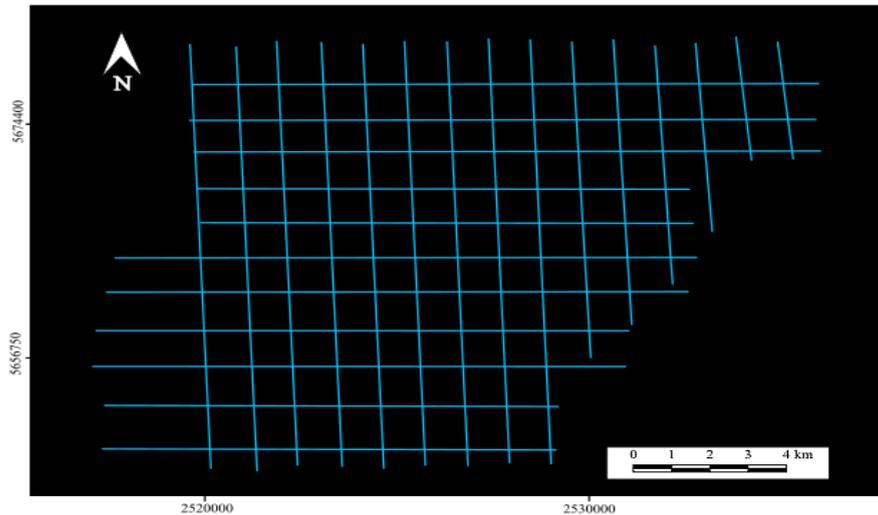


Figura 42. Interpretación del tope de la Fm. Quebrada del Sapo utilizando un grillado de 40 *inline* por 40 *crossline*.

Por cada grilla interpretada se realizó el picado automático “*autotrack*” con el objetivo de completar la interpretación en todos los sectores del volumen sísmico, utilizando para esto un coeficiente de cross-correlación entre el 80% y 70%. Interpretados los niveles mencionados, se procedió a interpretar los tope formacionales del Precuyo y el basamento cristalino. Para esto, se utilizó un primer grillado de 20 *inline* por 20 *crossline*, culminando con uno de 2 *inline* por 2 *crossline* en los sectores de mayor discontinuidad lateral. Debido a la complejidad estructural predominante en la zona, se optó por utilizar la herramienta de interpolación donde el software lleva a cabo la interpretación mediante el uso de un algoritmo generando una interpolación lineal entre el dato sísmico interpretado. De cada horizonte interpretado se obtuvo un mapa isócrono, el cual refleja los tiempos de ida y vuelta y permitió obtener una visualización de la estructura en tiempo de la zona de estudio (Fig. 43).

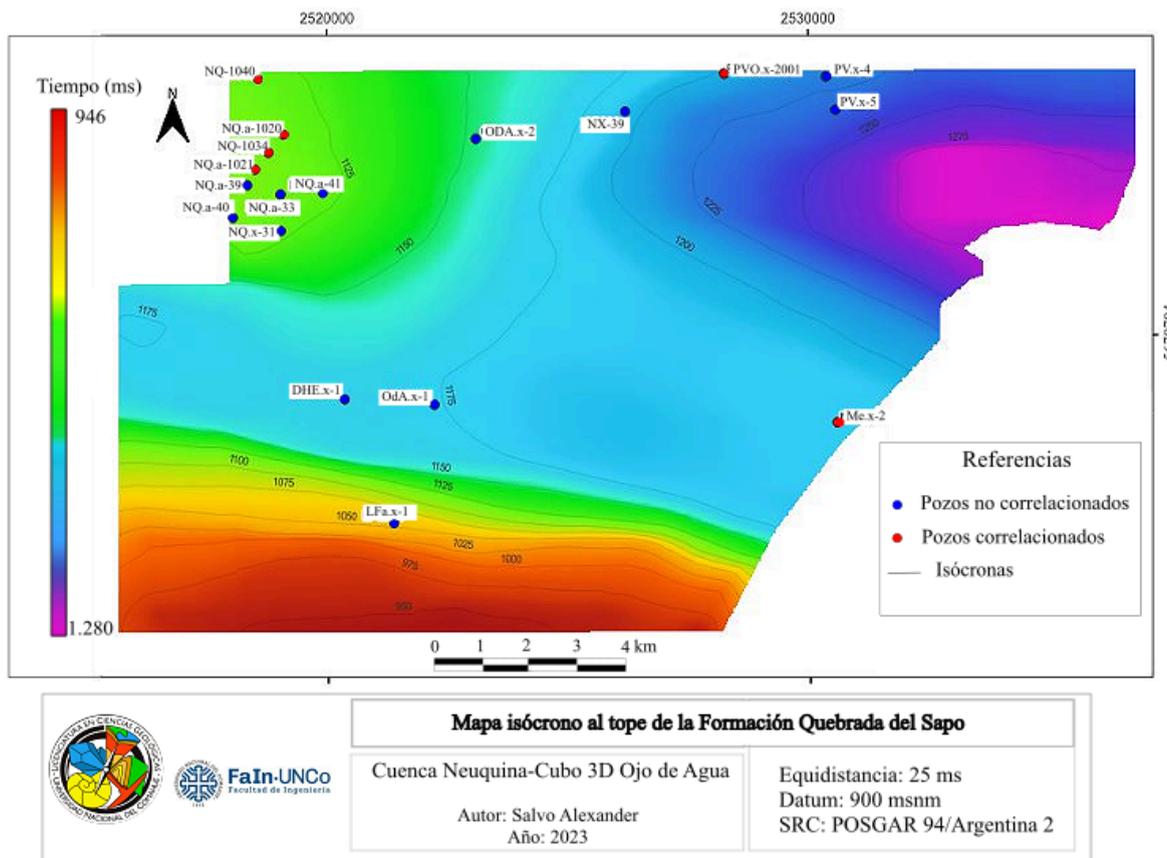


Figura 43. Mapa isócrono al tope de formación Quebrada del Sapo.

Las características y propiedades de los horizontes interpretados se describen a continuación. Los mapas asociados a estos niveles se describen posteriormente en la sección 8.1.

Tope basamento: Se interpreta a través de un reflector negativo (color rojo en el dato sísmico) de elevada amplitud. El arreglo de los reflectores subyacentes a este tope formacional tiene una configuración caótica, con un alto grado de irregularidades sin un arreglo definido como sí lo tienen las unidades suprayacentes (Fig. 44). Se destaca su presencia en toda el área, sin embargo, se encuentra afectado por numerosas estructuras en la porción central con un marcado arreglo antiformal. En la Fig. 50 se muestra el mapa isócrono al tope de este reflector.

Tope Precuyo: Se correlaciona con un reflector positivo (color negro en el dato sísmico) de carácter discontinuo y elevada amplitud (Fig. 44). Si bien se encuentra presente en toda el área con las características mencionadas, en los sectores australes y septentrionales se encuentra de manera discordante con el basamento cristalino. Hacia los sectores mencionados, se aprecia un importante acunamiento de esta sucesión con terminaciones del tipo *onlap* (este tema es desarrollado con mayor extensión en el apartado 8.2). En la Fig. 51 se muestra el mapa isócrono al tope de este reflector.

Tope Gr. Cuyo: Se interpreta a través de un reflector de amplitud positiva (color negro en el dato sísmico) subparalelo, de manera subyacente a la Fm. Quebrada del Sapo. Debido al cambio transicional de facies entre ambas unidades, no se visualiza un gran contraste de impedancias acústicas por lo cual, la amplitud del reflector, se mantiene en valores bajos.

Presenta gran continuidad dentro del volumen sísmico exceptuando los sectores australes y septentrionales donde se denota una disminución de amplitudes, con rechazos verticales (Fig. 44). En la Fig. 52 se ilustra el mapa isócrono al tope de esta formación.

Tope Fm. Quebrada del Sapo: Corresponde a un reflector de amplitud negativa, con elevados valores de este atributo debido al contraste de impedancias acústicas existente con las pelitas de la Fm. Vaca Muerta (Fig. 44). Si bien se caracteriza por ser un reflector de gran continuidad regional, en el área de estudio, se encuentra segmentado tanto hacia el norte como hacia el sur por dos importantes estructuras (Fig. 44). En la Fig. 53 se ilustra el mapa isócrono al tope de esta formación.

Tope Fm. Quintuco: En el área de estudio se correlaciona con un horizonte de elevada amplitud negativa (color rojo en el dato sísmico) y de carácter subparalelo, exceptuando su continuidad en los sectores austral y septentrional del volumen sísmico donde es afectado por la actividad tectónica (Fig. 44). En la Fig. 54 se ilustra el mapa isócrono al tope de esta formación.

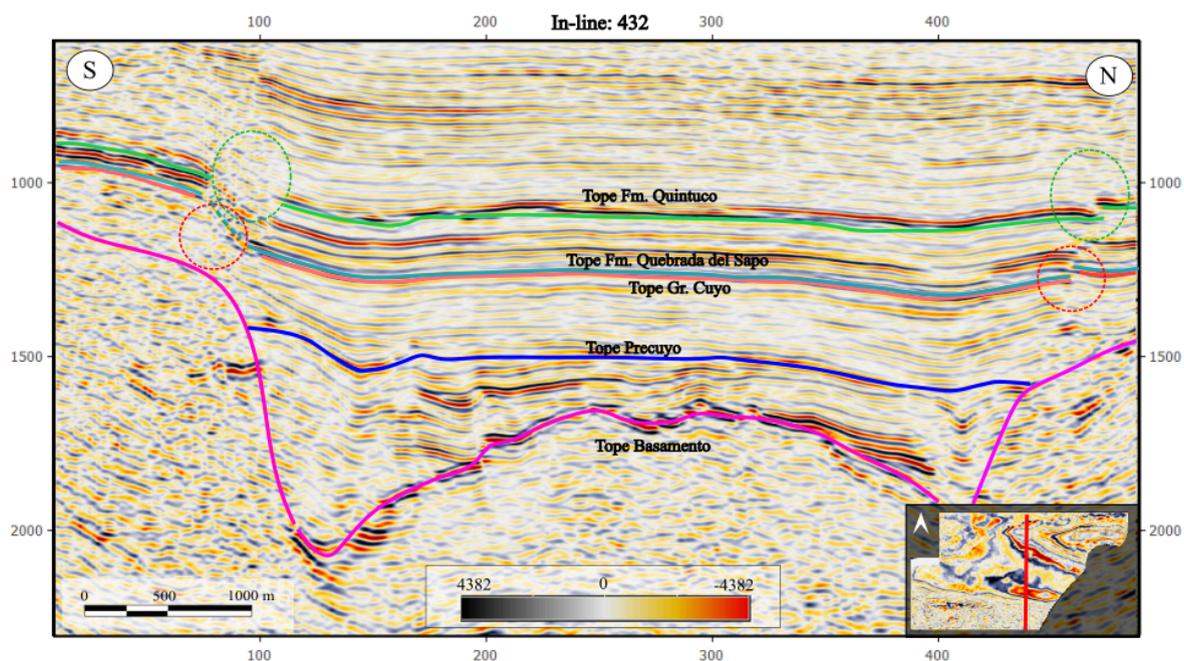


Figura 44. Sección sísmica inline con los topes formacionales interpretados. En círculos de color rojo se señalan los rechazos verticales en el Gr. Cuyo y la Fm. Quebrada del Sapo. En círculos de color verde se muestran los rechazos verticales en las unidades de la Fm. Quintuco.

7.5.2 Interpretación de fallas y discontinuidades

La interpretación de rasgos estructurales (fallas y/o discontinuidades) en el dato sísmico se realizó, en primera instancia, utilizando un grillado de 10 *inline* por 10 *crossline*. En aquellas zonas donde la continuidad de la falla o su identificación fue compleja, se redujo la interpretación a un grillado conformado de 5 *inline* por 5 *crossline* (Fig. 45).

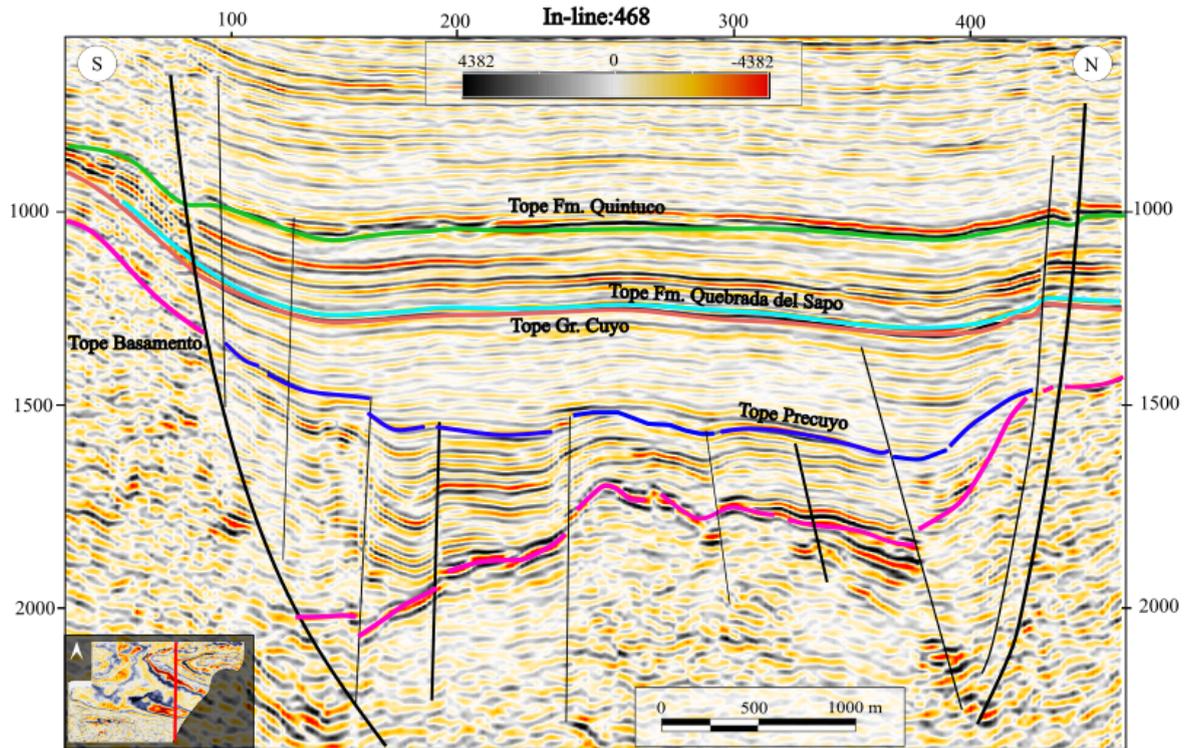


Figura 45. Sección sísmica en sentido N-S donde se detallan las fallas y reflectores sísmicos interpretados.

El reconocimiento de fallas en el dato sísmico se logró mediante el rechazo vertical de los reflectores sísmicos y la disminución de la amplitud de los mismos en las proximidades del rasgo estructural. Esto tiene su fundamento debido a que las rocas en una zona de falla, se encuentran muy fracturadas generando una reducción en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas P y por consiguiente, una disminución en las impedancias acústicas y coeficientes de reflexión, respectivamente. Para mejorar la interpretación de los rasgos estructurales, se procesaron volúmenes de atributos sísmicos que permitieron resaltar aquellas zonas con predominio de fracturas, fallas o discontinuidades como es el caso de los atributos de *pseudo relief* mediante secciones sísmicas y *similarity* en planta (Fig. 46).

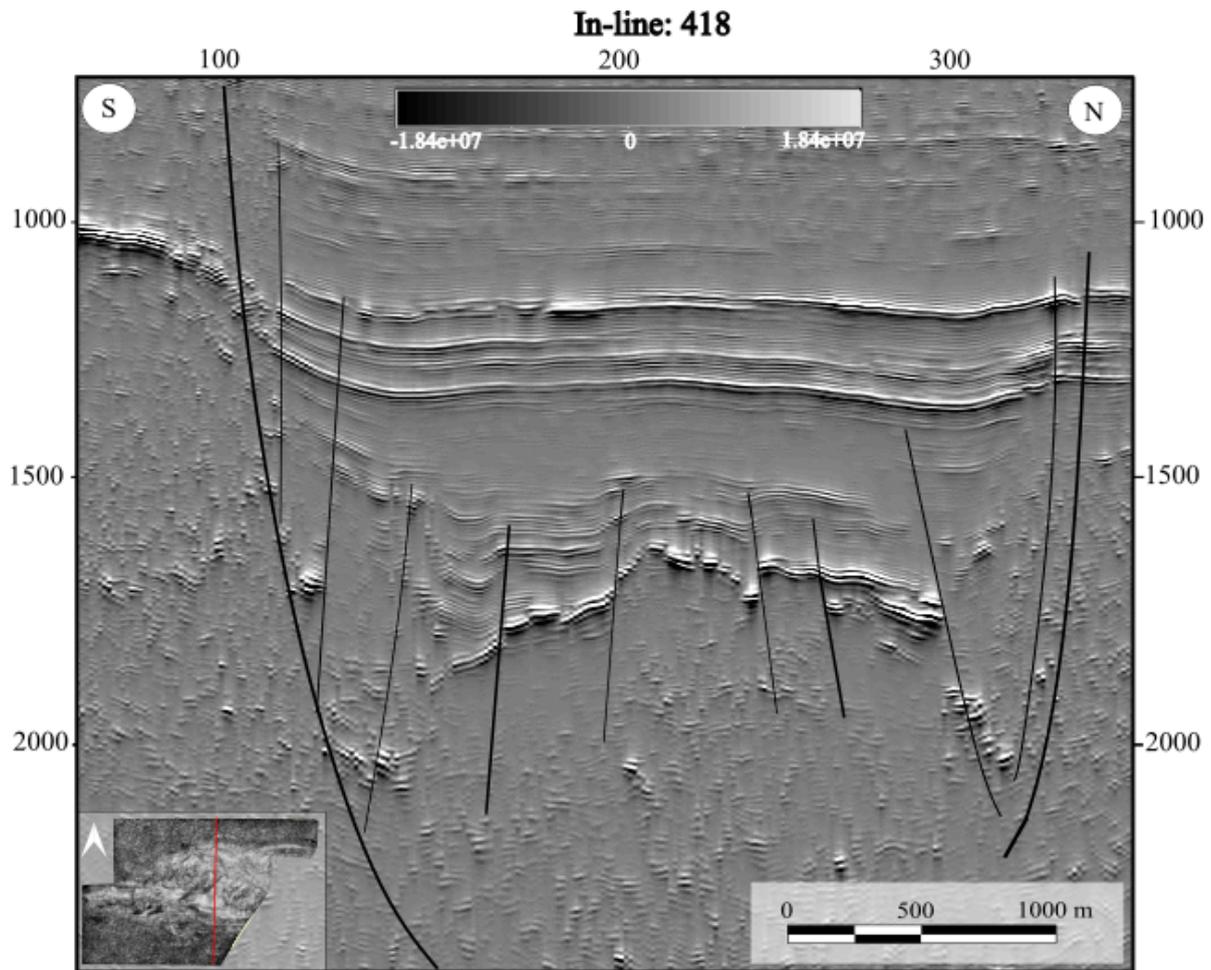
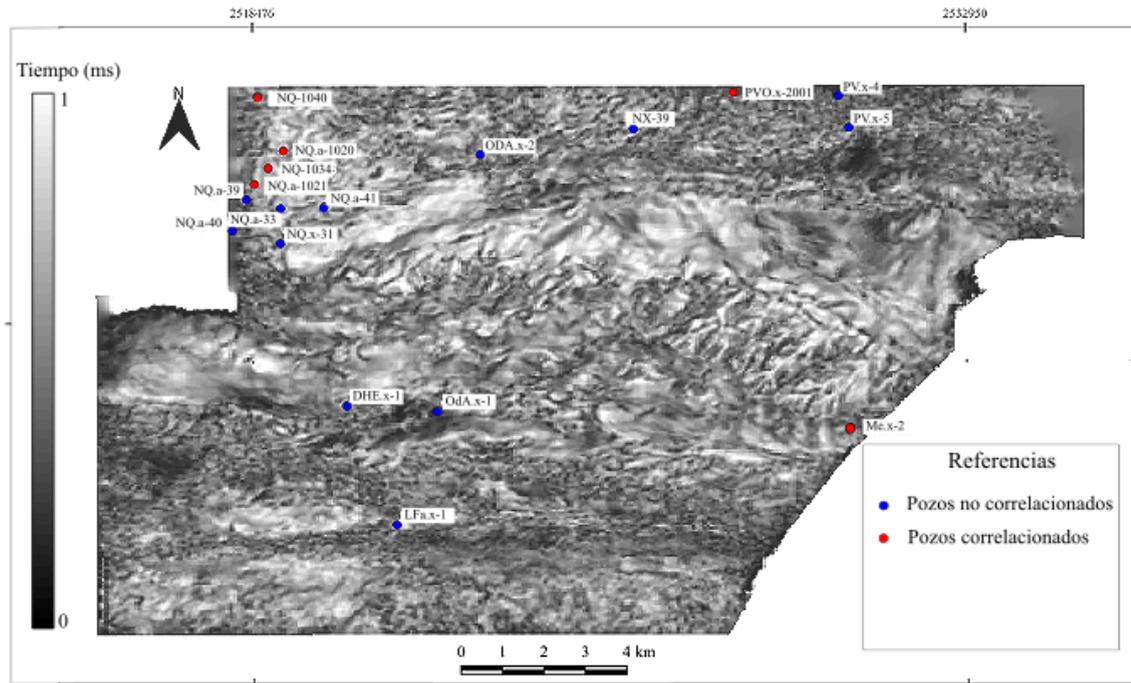
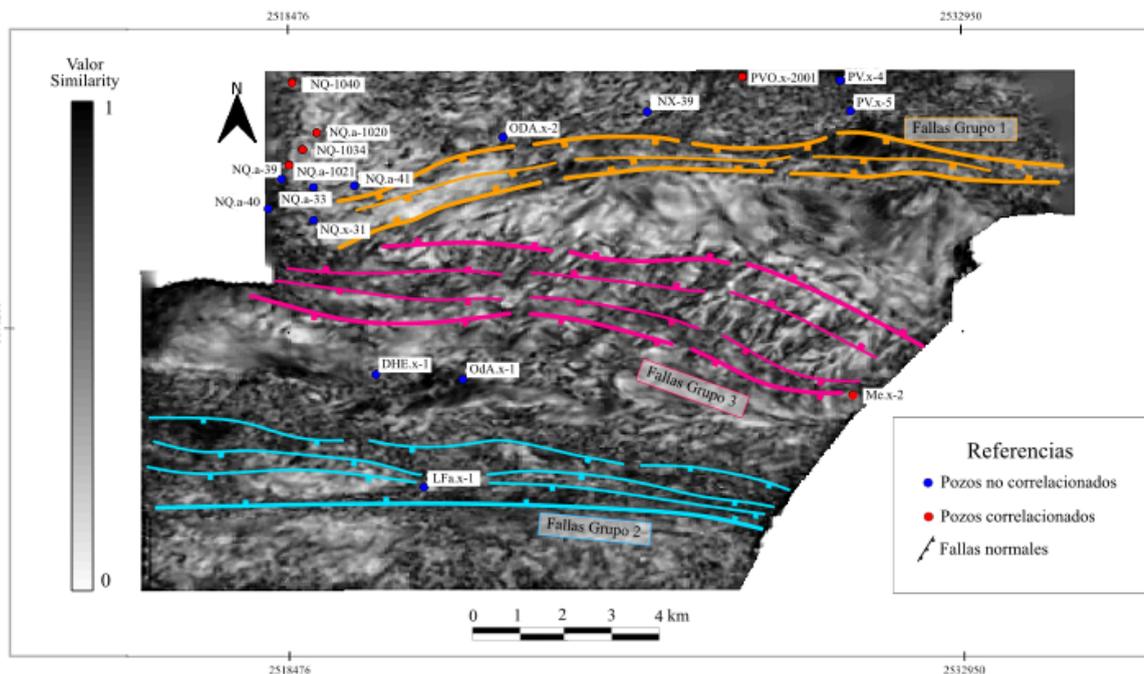


Figura 46. Sección sísmica N-S con atributo *pseudo relief* donde se detallan las principales fallas.

Con el análisis integral de los mapas isócronos (apartado 8.1.1), isocronopáquicos (apartado 8.1.2) y el cálculo de atributos de discontinuidad (apartado 8.1.3), se logró identificar 3 grupos de fallas principales dentro del área de estudio con dominios estructurales característicos (Fig. 47).



	Mapa de atributo similarity al tope del Basamento	Datum: 900 msnm SRC: POSGAR 94/Argentina 2
	Cuenca Neuquina-Cubo 3D Ojo de Agua Autor: Salvo Alexander Año: 2023	



	Mapa de atributo similarity al tope del Basamento	Datum: 900 msnm SRC: POSGAR 94/Argentina 2
	Cuenca Neuquina-Cubo 3D Ojo de Agua Autor: Salvo Alexander Año: 2023	

Figura 47. Mapa de atributo *similarity* al tope del basamento cristalino con las principales fallas interpretadas.

Grupo 1

Se ubican en el sector septentrional del área. En la porción oriental se presentan con orientación E-O (azimut $\sim 90^\circ$) mientras que hacia el oeste, el rumbo se define en dirección ENE-OSO (azimut $\sim 82^\circ$) (Fig. 47).

La estructura principal corresponde a una falla lítrica, con inclinación hacia el sur. En secciones sísmicas N-S (Fig. 48), se visualiza subvertical y en profundidad tiende a horizontalizarse. La deformación inicia en las unidades del basamento cristalino y se propaga hasta la secuencia Quintuco-Vaca Muerta, con rechazos en el orden de 24 ms en el sector oriental del área y 12 ms en la parte occidental.

Asociada a la falla lítrica, se encuentra una serie de fallas subsidiarias de acomodación sintéticas y antitéticas con inclinaciones hacia el norte y hacia el sur respectivamente. Estas fallas hacia el oeste del área presentan una disminución en los rechazos verticales, manteniendo su influencia sólo en las unidades del basamento (Fig. 49). Asimismo, es importante mencionar que en el sector occidental del área se logró visualizar un conjunto de rasgos estructurales de comportamiento vertical, los cuales se atribuyen posiblemente a fallas de rumbo debido a su nulo rechazo vertical en las sucesiones sedimentarias y una importante disminución de amplitudes en los reflectores sísmicos tal y como se señala con líneas discontinuas y en recuadro rojo en la figura 49.

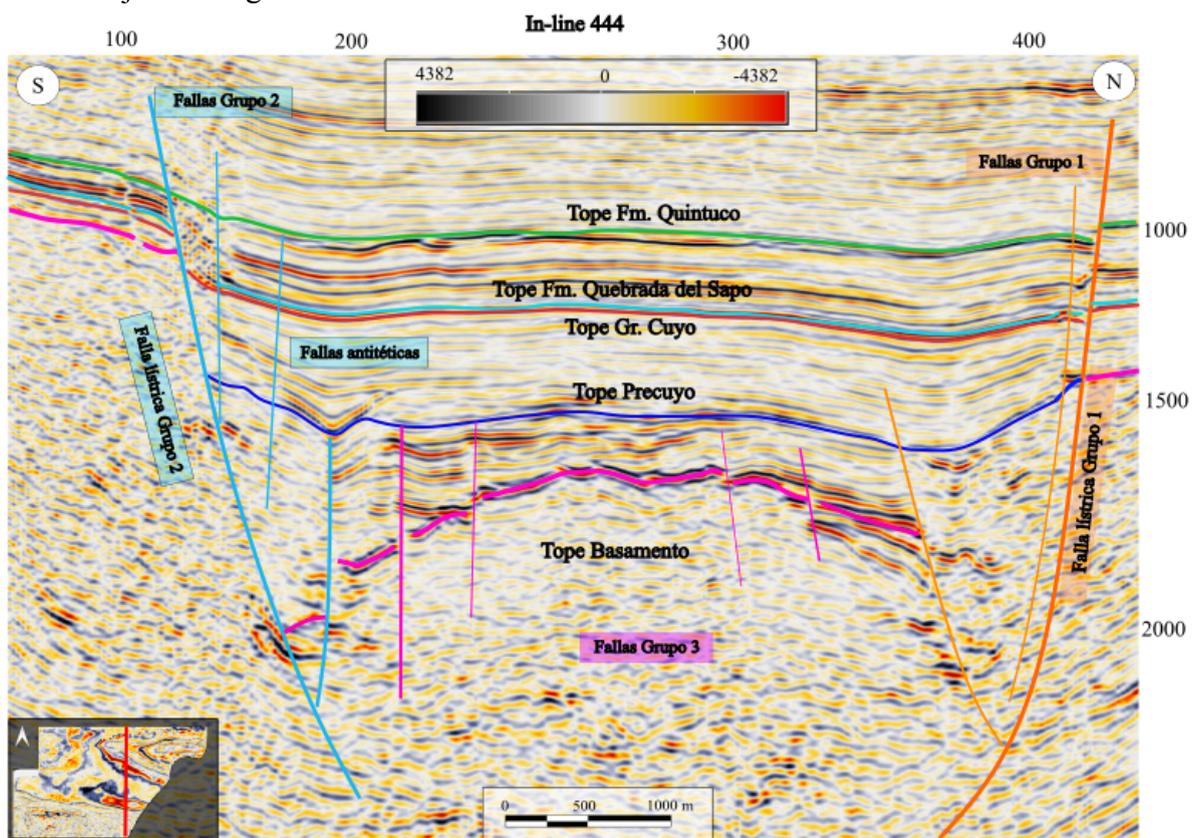


Figura 48. Sección sísmica N-S con fallas de los grupos 1, 2 y 3 interpretadas.

Grupo 2

Se ubica en el sector sur del área con un rumbo preferencial ONO-ESE (azimut $\sim 95^\circ$) (Fig. 47). La estructura principal corresponde a una falla lítrica con desplazamiento normal e

inclinación hacia el norte, desarrollando un importante horst (Fig. 48 y Fig.49). Vinculada a la falla listrica, existe una serie de fallas antitéticas con inclinación hacia el sur, las cuales presentan rechazos en el orden de 107 ms en el sector oriental y 142 ms en la porción occidental sobre las sucesiones jurásicas y cretácicas.

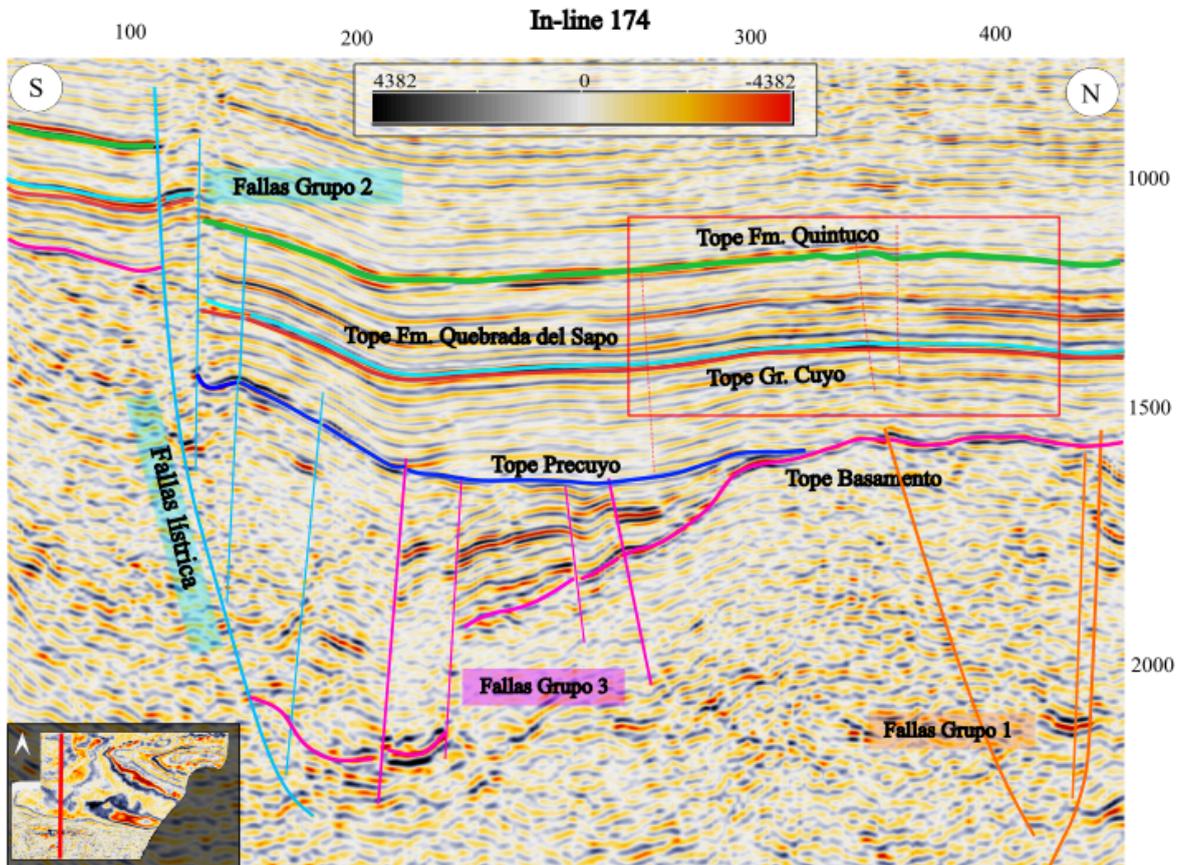


Figura 49. Sección sísmica con orientación N-S donde se detallan las fallas interpretadas. En recuadro de color rojo y líneas punteadas se señalan las posibles fallas de rumbo.

Grupo 3

Las fallas del grupo 3 se ubican en el sector central del área con un rumbo preferencial ONO-ESE (azimut $\sim 105^\circ$) sin embargo hacia el sector occidental del dato sísmico presentan un rumbo E-O (azimut $\sim 90^\circ$) (Fig. 47). En secciones sísmicas N-S, perpendiculares a su rumbo, se presentan subverticales, con inclinación tanto hacia el sur como hacia el norte, con rechazo vertical en las secuencias del Precuyo (Fig. 48 y Fig. 49).

Corresponden a fallas de comportamiento normal que acomodan la deformación en el bloque de techo del hemigraben durante la generación del anticlinal rollover (Fig. 49).

8. RESULTADOS

8.1 Elaboración y análisis de mapas

8.1.1 Mapas isócronos

Los mapas isócronos están formados por curvas de igual tiempo de ida y vuelta de las ondas sísmicas en sentido vertical. Estos mapas permiten obtener un panorama generalizado de las estructuras en tiempo en cada reflector sísmico interpretado.

Cada mapa representa el reflector interpretado con las intersecciones de las fallas mapeadas, junto con una escala de color para identificar los niveles con mayor tiempo sísmico (violeta) que corresponden a mayor profundidad y los de menor tiempo sísmico (rojo), más someros.

Para las unidades profundas del basamento cristalino (Fig. 50), se han interpretado estructuras tanto al sur como hacia el norte del área, las cuales controlan el desarrollo de la sedimentación de los niveles suprayacentes. Los bloques yacientes asociados a las fallas lístricas descritas anteriormente, ubicadas al sur y al norte conforman dos horsts (menores tiempos en el mapa isócrono) que delimitan la depositación de la secuencia sedimentaria en el centro del área (Fig. 50).

Por otra parte el bloque colgante de las fallas lístricas mencionadas, se encuentra a su vez fallado, determinando dos zonas profundas aproximadamente simétricas, hacia el norte y el sur, con mayores tiempos de ida y vuelta (color violeta/azul en el mapa isócrono) limitadas en el sector central por un alto relativo (color verde-amarillo en el mapa isócrono).

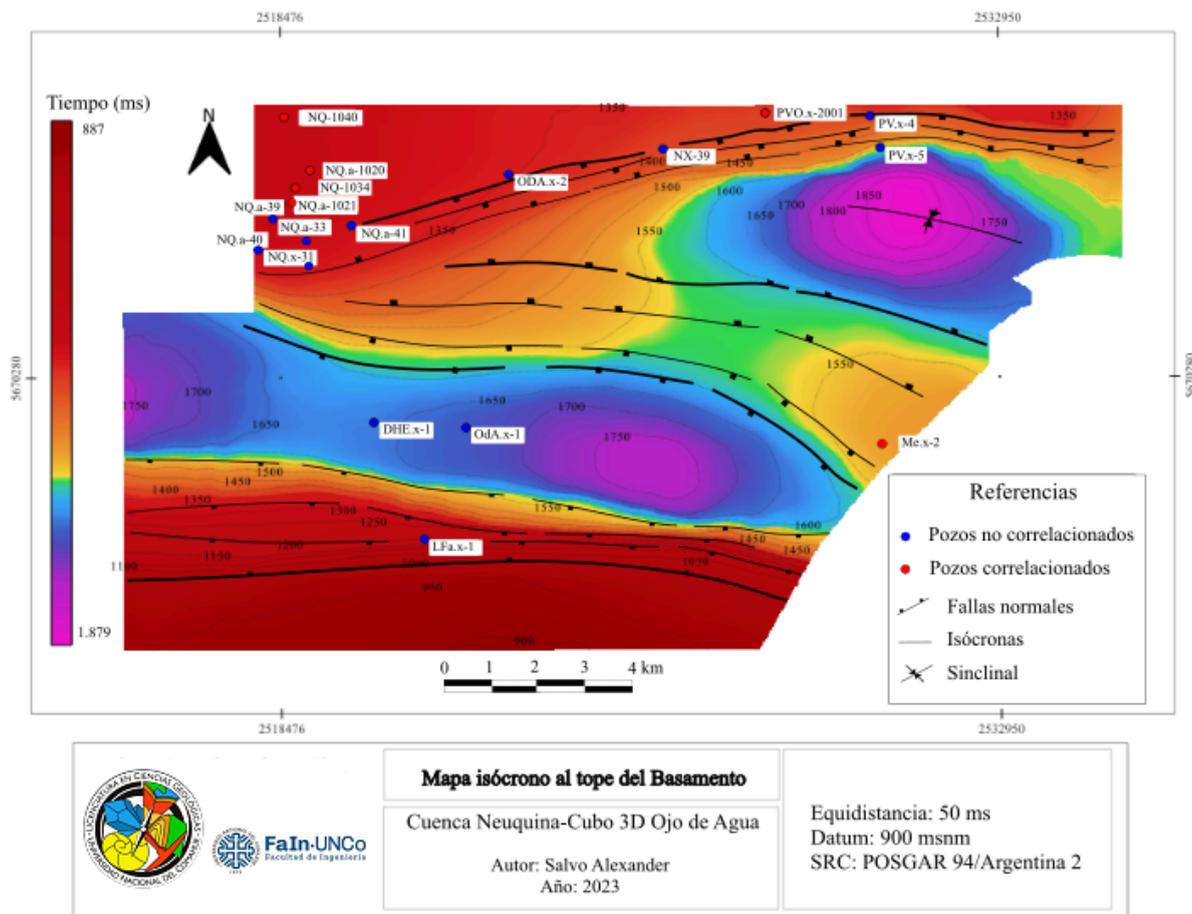


Figura 50. Mapa isócrono al tope del basamento cristalino con las principales estructuras interpretadas.

Las estructuras mencionadas previamente existentes en el basamento controlaron la depositación del Precuyo y las unidades suprayacentes. Esto se aprecia en el mapa isócrono al tope del Precuyo (Fig. 51) donde persisten dos máximos estructurales (menores tiempos de ida y vuelta, color rojo en el mapa isócrono) hacia el sur y norte, con un gran depocentro

generalizado en la parte central (mayores tiempos de ida y vuelta, color celeste y violeta en el mapa isócrono). Los colores grises dentro del mapa indican zonas de erosión y/o no depositación de esta unidad en el área de estudio. Cabe mencionar que los pozos Nq-1040 y NQ.a-1020 cuentan con un registro muy acotado del Precuyo (apartado 8.3) y posiblemente el espesor de esta unidad en ambos pozos se encuentre por debajo del límite de resolución sísmica. Por tal motivo en la Fig. 51 se encuentran en una zona de no depositación.

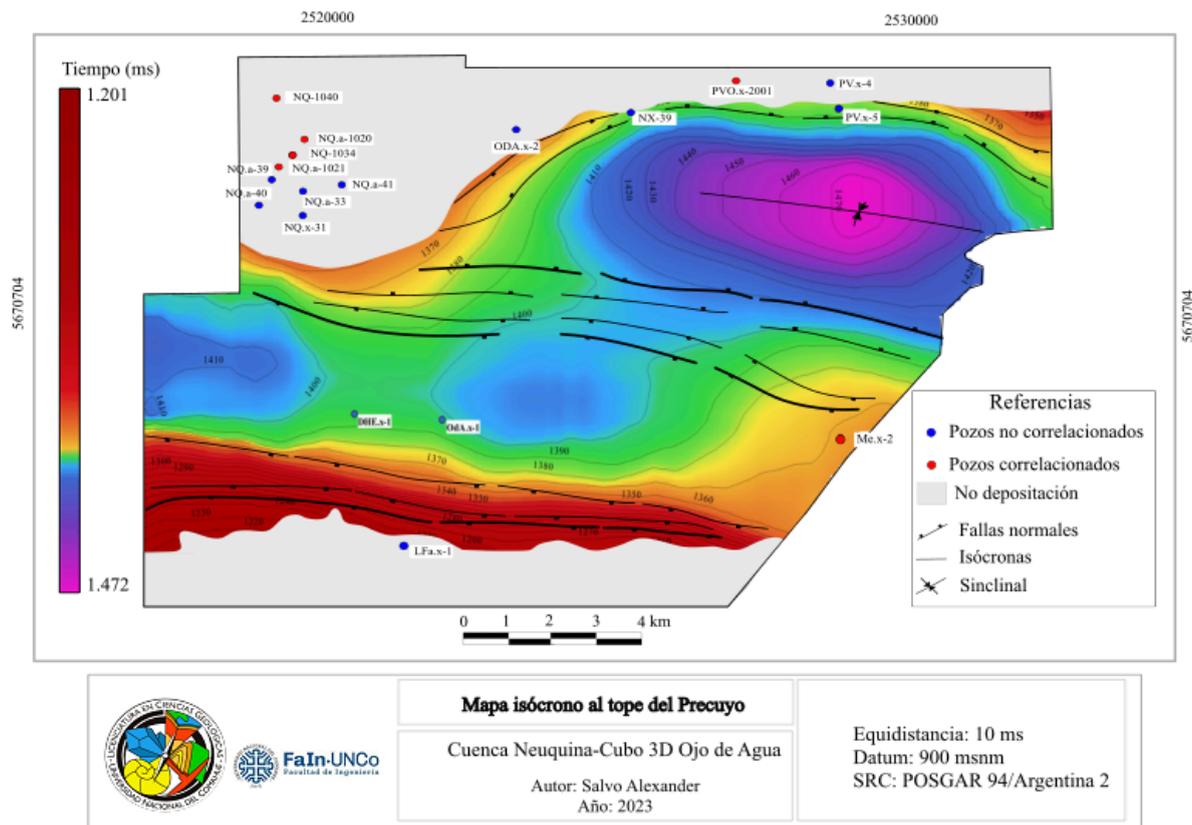


Figura 51. Mapa isócrono al tope del Precuyo con las principales estructuras interpretadas.

Al igual que las unidades anteriores, los mapas isócronos al tope del Gr. Cuyo (Fig. 52) y las Fms. Quebrada del Sapo (Fig. 53) y Quintuco (Fig. 54) presentan un claro control estructural dado por las estructuras presentes tanto hacia el sur como hacia el norte, donde prevalecen los menores tiempos de ida y vuelta (color verde y rojo). Sin embargo, el depocentro existente en la zona central se extiende de forma generalizada hacia el NNE (color celeste en mapas isócronos).

En el sector NNO del área prevalece un alto estructural caracterizado por menores tiempos de ida y vuelta (color amarillo/naranja en los mapas isócronos) asociado a las estructuras normales del Grupo 1 descritas anteriormente. Este alto estructural se encuentra segmentado mediante posibles fallas de rumbo con orientación NNE-SSO (azimut $\sim 30^\circ$) que atraviesan los depósitos del Cretácico Inferior (Fig. 54) lo cual podría correlacionarse con las zonas de transferencias mencionadas por Cristallini *et al.*, (2009). Por otro lado, se logró visualizar tanto en secciones sísmicas como en los diferentes mapas para estos niveles, una posible zona de fallamiento de rumbo (Fig. 52, Fig. 53 y Fig. 54) con similar orientación (ONO-ESE) a las estructuras precuyanas mencionadas dentro del grupo 3.

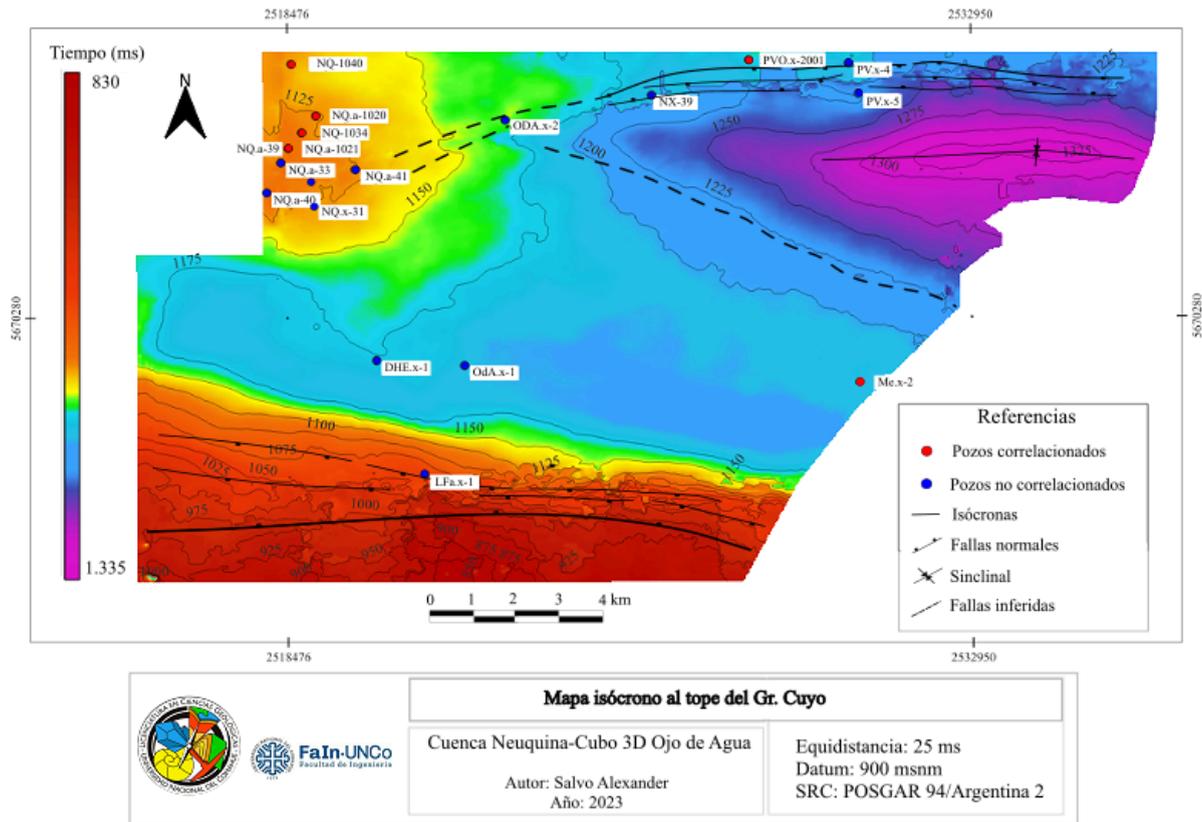


Figura 52. Mapa isócrono al tope del Gr. Cuyo con las principales estructuras interpretadas.

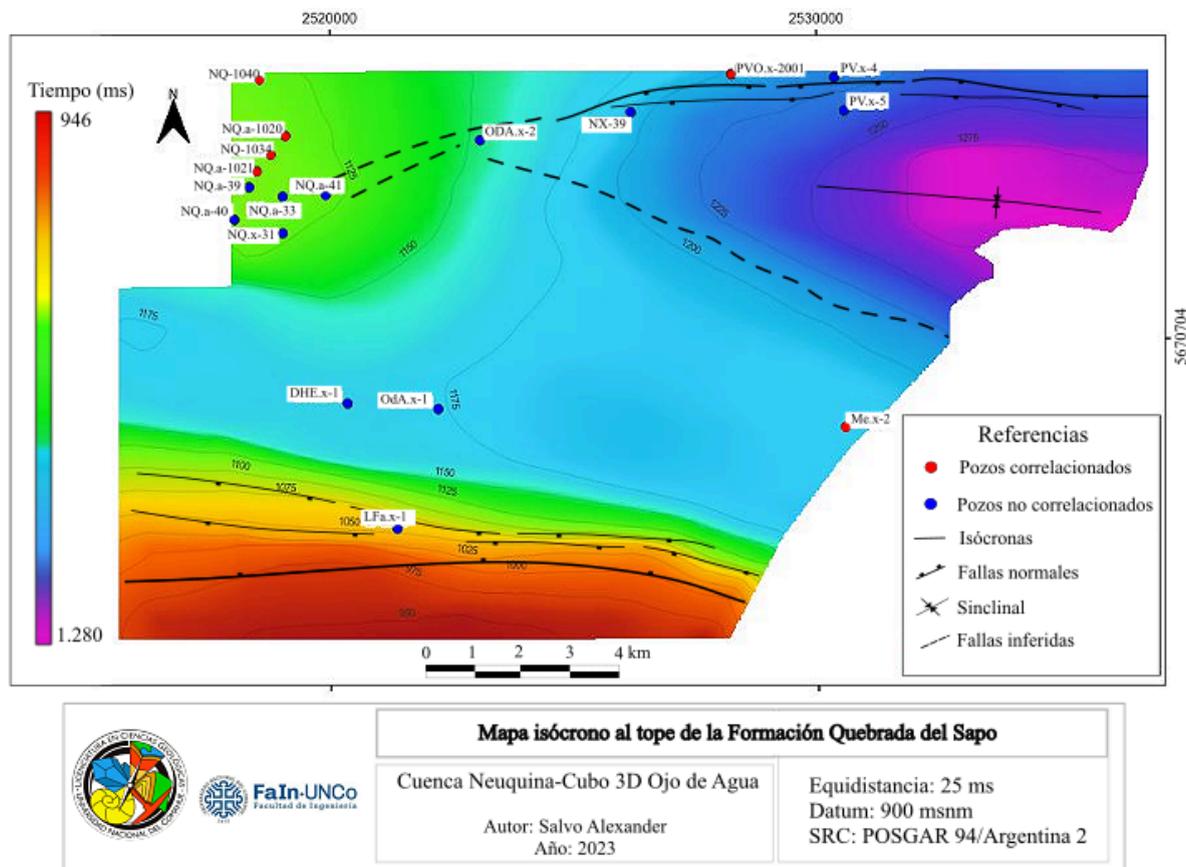


Figura 53. Mapa isócrono al tope de las Fm. Quebrada del Sapo con las principales estructuras interpretadas.

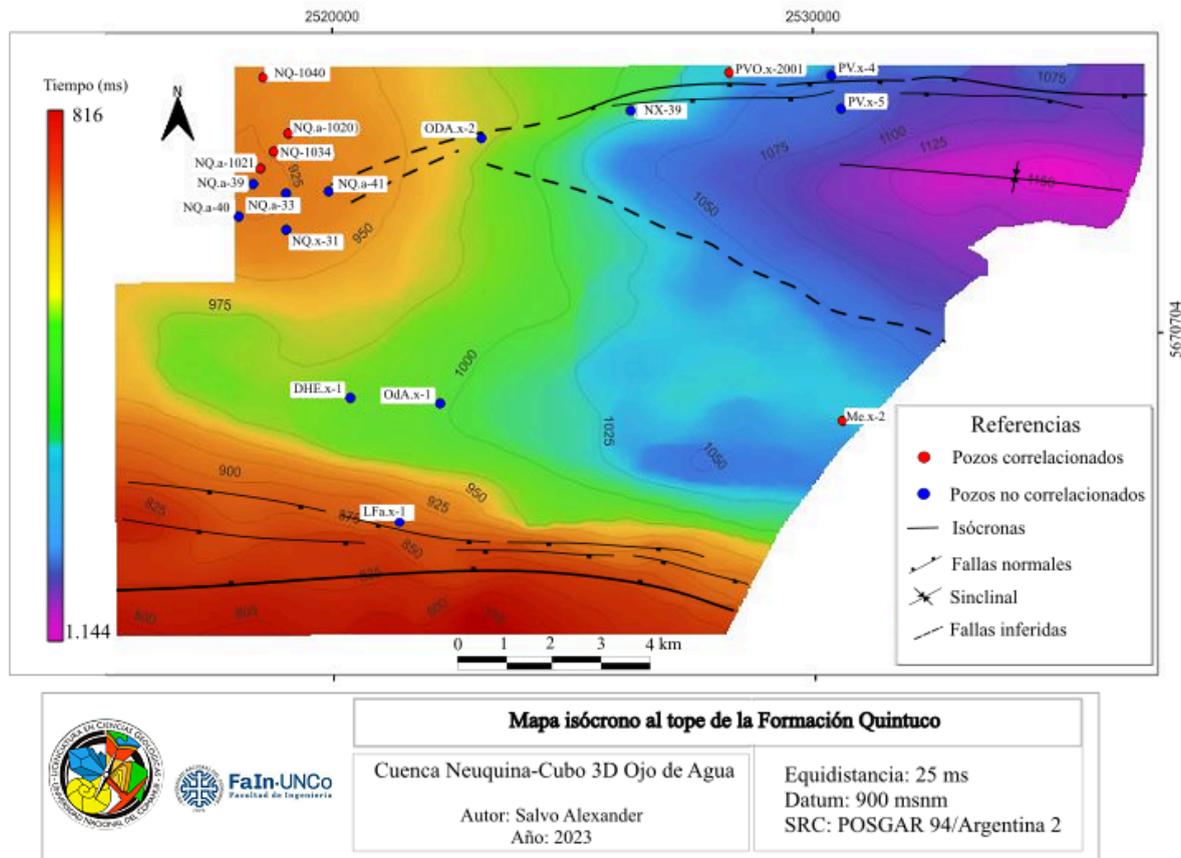


Figura 54. Mapa isócrono al tope de las Fm. Quintuco con las principales estructuras interpretadas.

8.1.2 Mapas isocronopáquicos

Los mapas isocronopáquicos representan los espesores de una determinada unidad interpretada en tiempo. En este estudio permitieron visualizar de forma preliminar los diferentes momentos en el registro sedimentario dentro del área de estudio y, en conjunto con los mapas isócronos, analizar posibles pulsos con mayor actividad tectónica, estructuración y/o erosión.

El mapa isocronopáquico del Precuyo (Fig. 55) presenta los menores espesores (color rojo) tanto al norte como hacia el sur, lo cual coincide con la ubicación de los horsts mencionados previamente. El mayor espesor del registro sedimentario (color violeta y celeste), se encuentra ubicado en dos sectores, asociado a las fallas normales del Grupo 1 y 2, generando depósitos con geometría de cuña típico de secuencias de synrift tal y como puede observarse en las figuras 48 y 49. Estos depocentros corresponden a hemigrábenes, con rumbo OSO-ENE, delimitados por las fallas normales mencionadas.

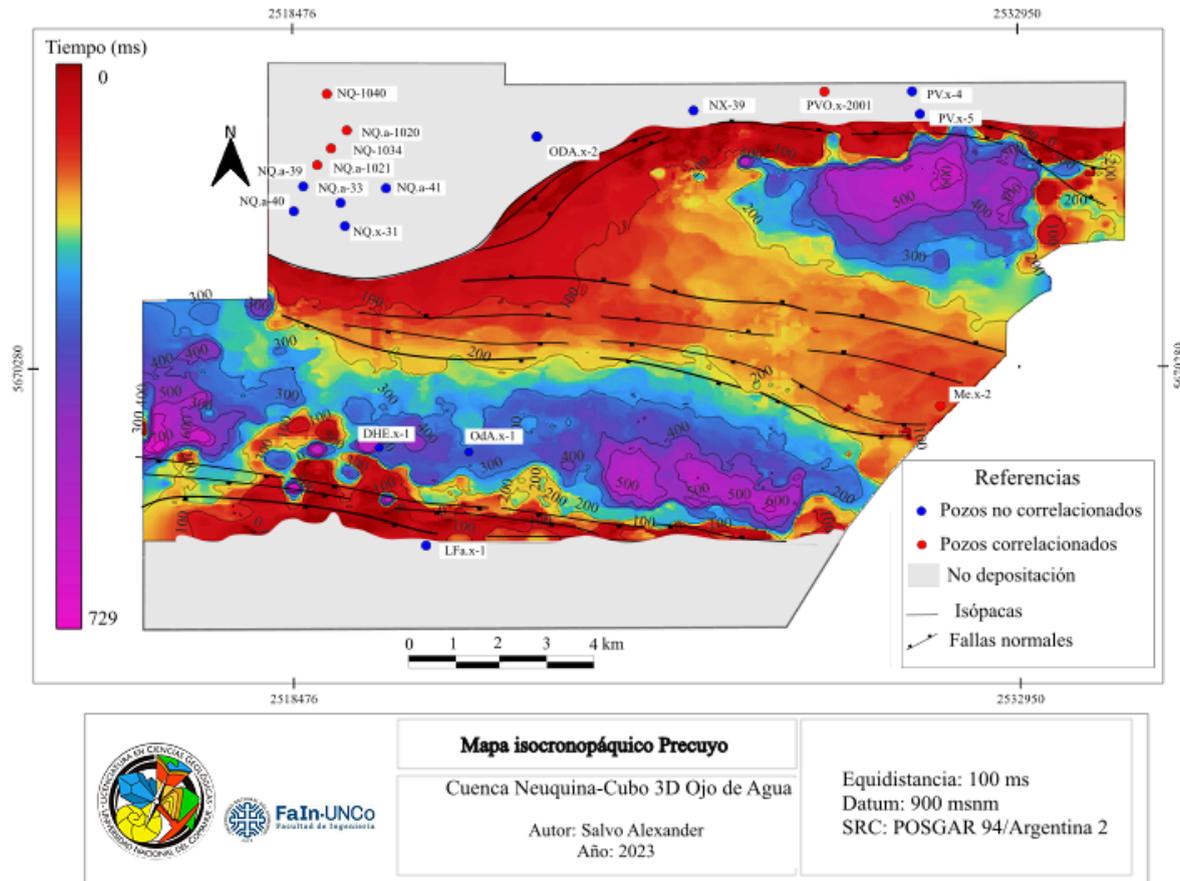


Figura 55. Mapa isocronopáquico del Precuyo con superposición de fallas al tope de dicho nivel.

El mapa isocronopáquico correspondiente al Gr. Cuyo (Fig. 56) permite identificar la tendencia depositacional de las sucesiones precuyanas en concomitancia con el control estructural de las fallas principales en la depositación de esta unidad. La zona de máxima acumulación (color celeste y violeta) se desarrolla con un sentido E-O, mientras que los sectores con menores espesores (color rojo) se localizan tanto hacia el sur como hacia el norte. En color gris se señalan las zonas de erosión y/o no depositación. En este mapa prácticamente no se observa la disminución de espesor en el centro del área, que estaba presente en el mapa isocronopáquico del Precuyo. Esto se atribuye a que en los últimos estadios de sedimentación del Gr. Cuyo el alto estructural relativo en el sector central del área no estaría presente, permaneciendo activas las fallas norte y sur que limitan la depositación. Además, no se observan depósitos del tipo “cuña” por lo que se presupone que la extensión se mantuvo activa hasta las etapas iniciales de depositación del Gr. Cuyo.

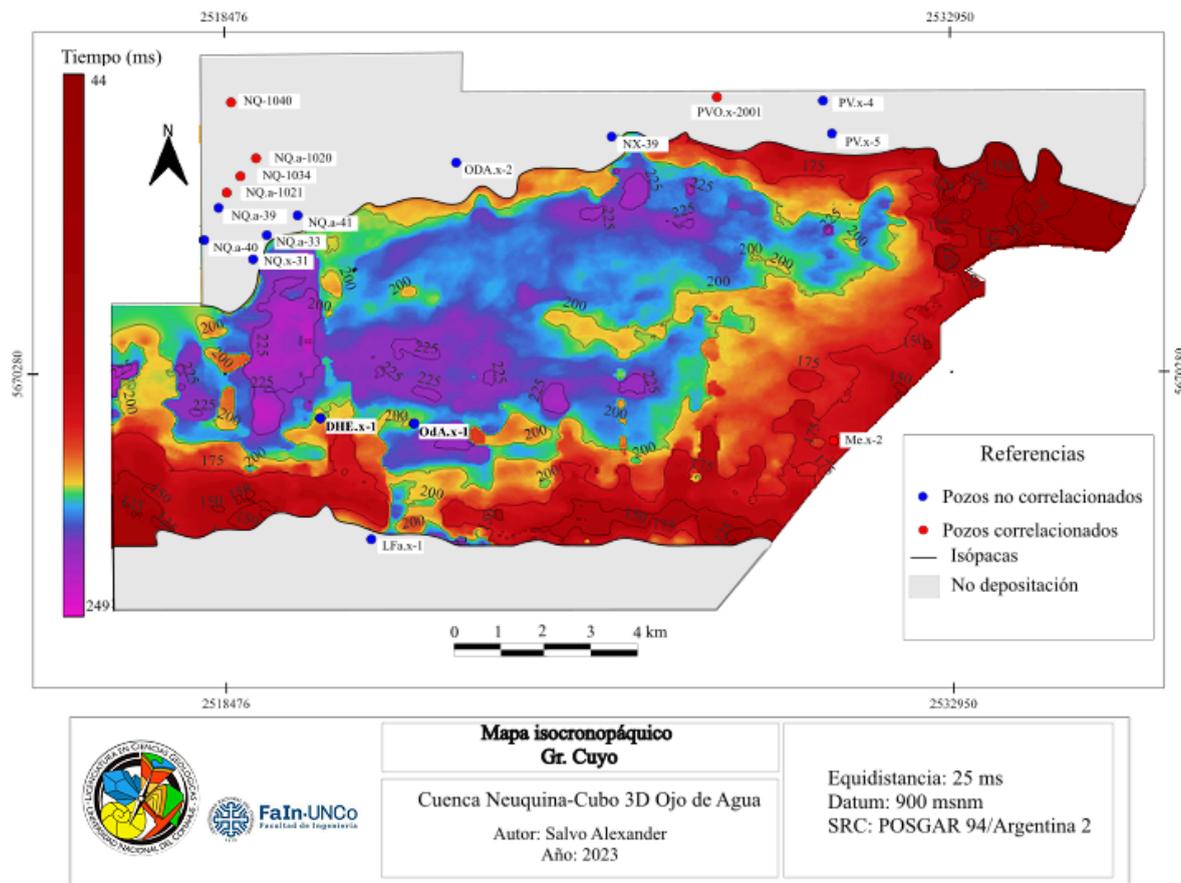


Figura 56. Mapa isocronopáquico correspondiente al Gr. Cuyo.

En el mapa isocronopáquico de la Fm. Quebrada del Sapo (Fig. 57) se observa el espesor relativamente constante que posee esta unidad, en el orden de los 10 ms que corresponde aproximadamente a 20 m, considerando la velocidad media para dicha formación es de 4064 m/s (75 us/ft). En relación con los datos de pozos, los espesores de esta unidad están en el orden de los 15 m, lo cual, si se tiene en consideración el cálculo de resolución vertical realizado para estos niveles está en el orden de 17-18 m, se puede determinar que este intervalo se encuentra por debajo del límite de resolución sísmica, por lo tanto las variaciones de espesor que pudieran existir no se verán reflejadas. A partir de lo mencionado, el mapa isocronopáquico de esta unidad no representa con claridad la realidad geológica.

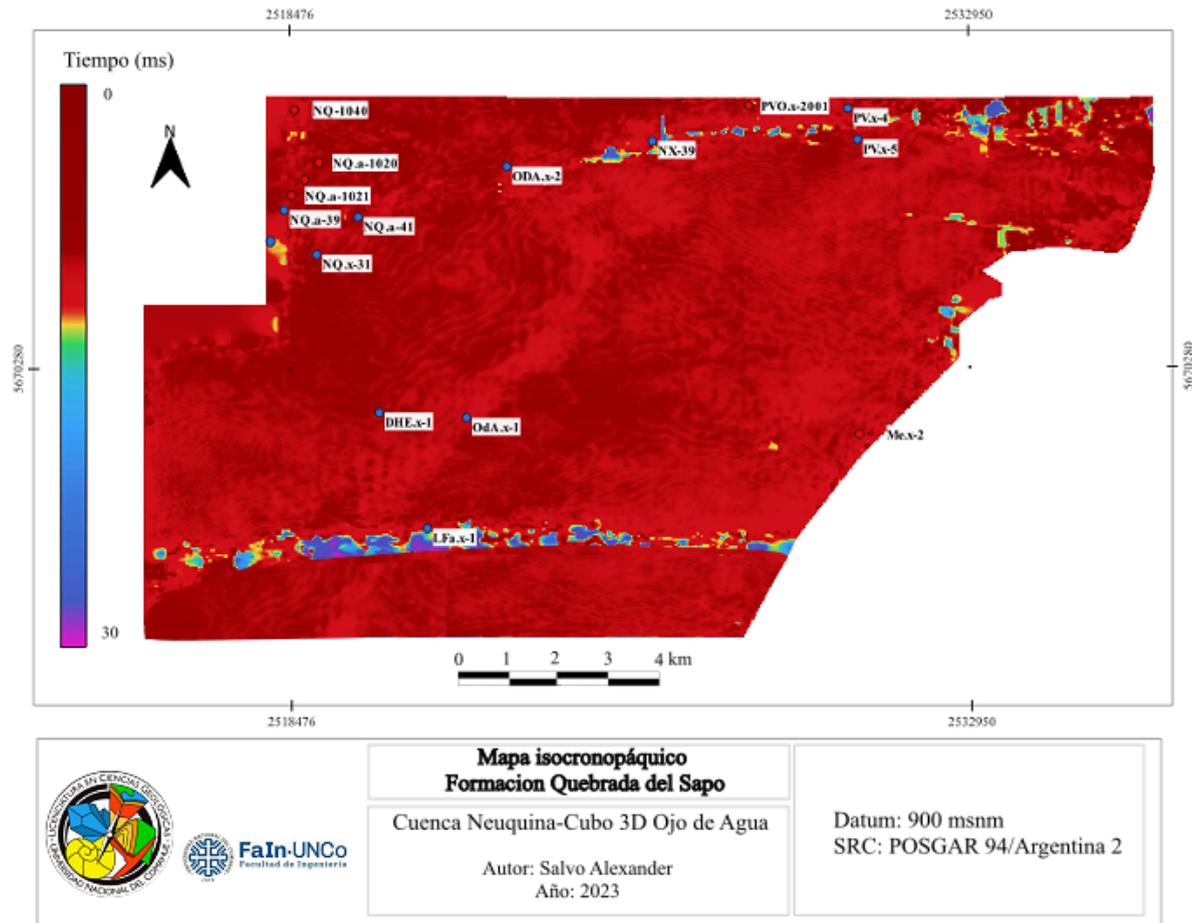


Figura 57. Mapa isocronopáquico de la Formación Quebrada del Sapo.

La etapa depositacional de la secuencia Quintuco-Vaca Muerta se habría caracterizado por una relativa calma tectónica, con espesores constantes (color celeste) en gran parte del área lo cual sugiere un estadio de subsidencia termal en la depositación. Al igual que las unidades subyacentes, el espesor de esta secuencia disminuye hacia el sur sobre el alto estructural (color rojo). En el sector central de sudeste a noroeste se reconoce un leve aumento de espesor, asociado a la localización del centro de cuenca en el noroeste del área, rasgo que se asocia con los rasgos estratigráficos identificados que se describirán más adelante. Sin embargo, sobre el sector sudoeste, prevalece una zona de máxima acumulación (color violeta) sugiriendo un leve control estructural presumiblemente por cambios en la tasa de subsidencia (Fig. 58).

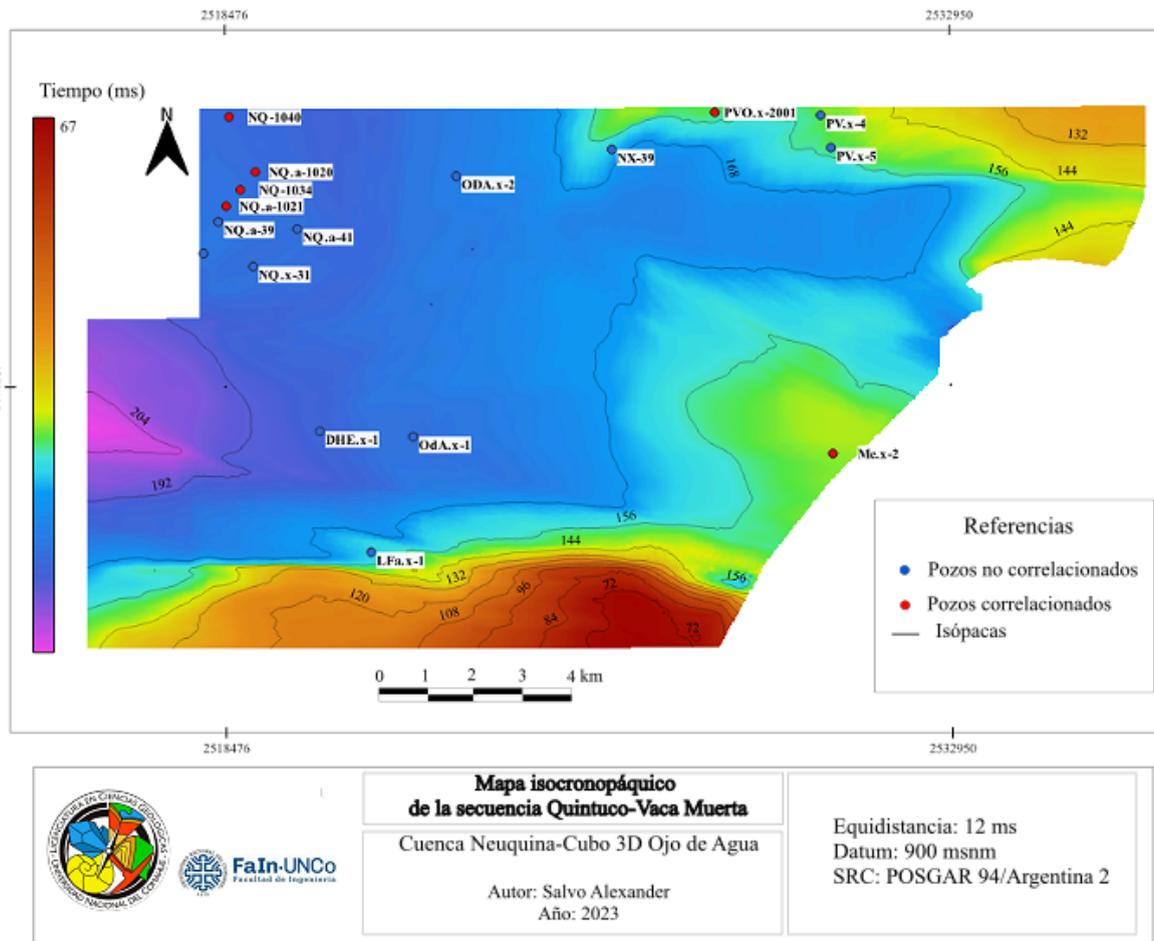


Figura 58. Mapa isocronopéptico correspondiente al sistema Quintuco-Vaca muerta.

8.1.3 Mapas de atributos

Para los niveles de interés en este estudio, se realizaron mapas con los atributos *similarity* y amplitud. Las variaciones de amplitud permiten identificar y vincular zonas con variaciones en el contraste de impedancia acústica de las rocas, que, a su vez, responden al cambio de la velocidad y densidad de éstas (características litológicas, fluidos, variaciones laterales de facies, etc).

Los mapas de atributo *similarity* al tope del basamento (Fig. 47) y Precuyo (Fig. 59) permitieron confirmar la existencia de las tres familias de fallas descritas anteriormente con mayor detalle. Los mapas de *similarity* evidencian la discontinuidad de los reflectores sísmicos, especialmente en los sectores norte y sur del área. En gris oscuro-negro se representan los sectores de mayor discontinuidad, que se asocia con la presencia de fallas, como pudo corroborarse en las secciones sísmicas de orientación norte-sur previamente ilustradas en las figuras 45 y 46.

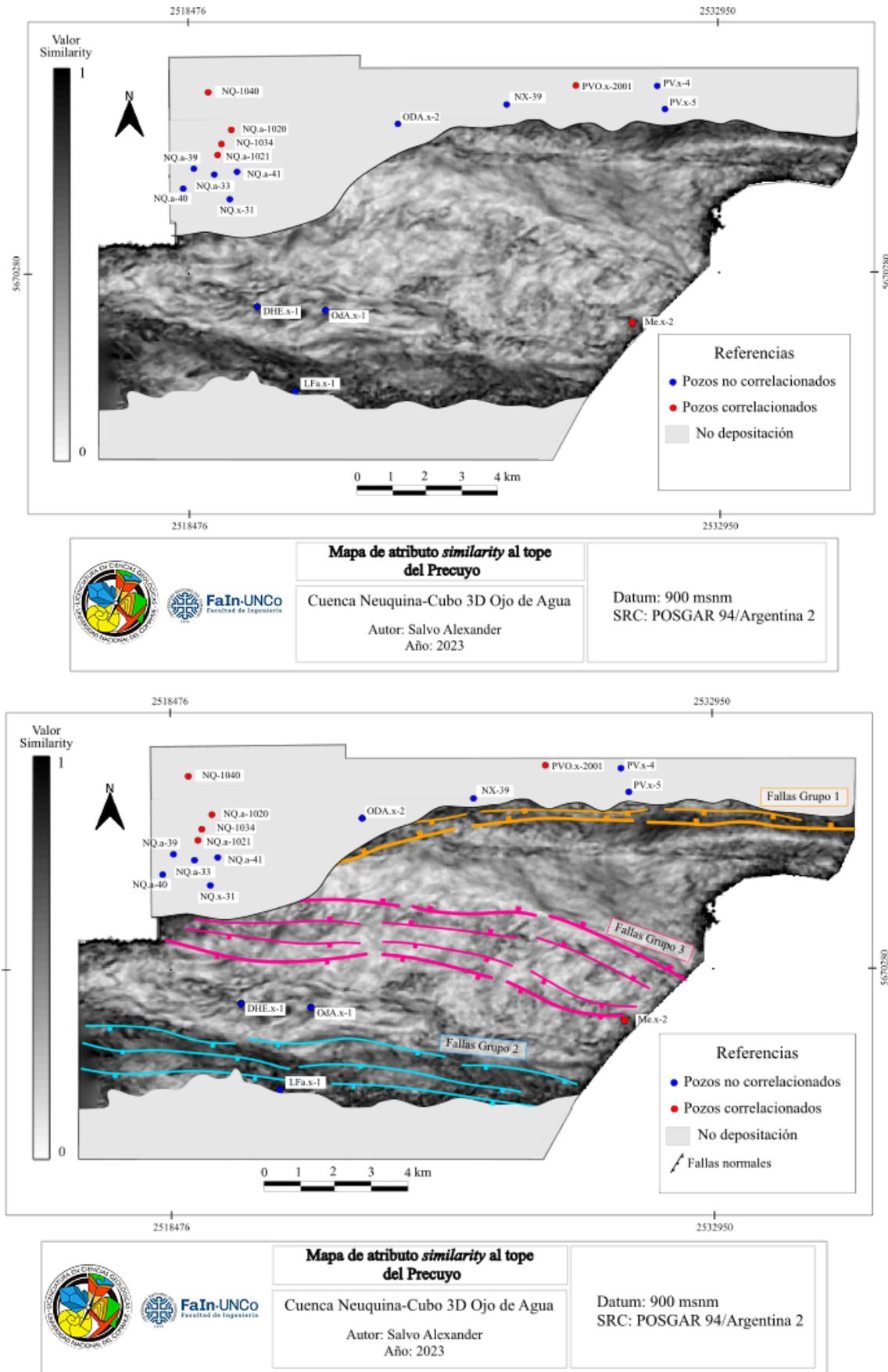
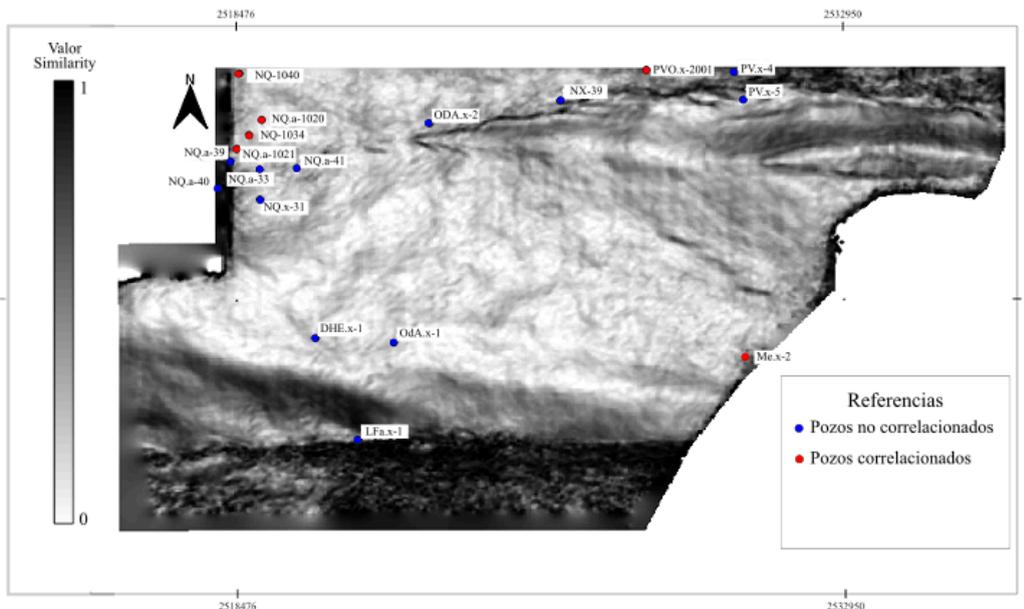
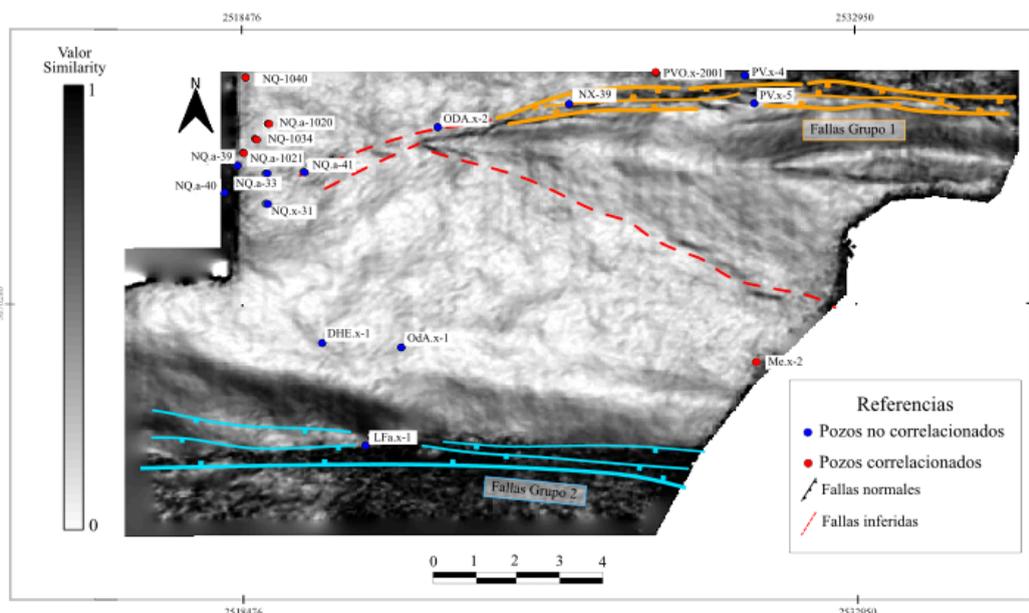


Figura 59. Mapa de atributo *similarity* al tope del Precuyo con las fallas interpretadas.

Las fallas normales lístricas presentes en el sector septentrional y austral controlaron la sedimentación durante la etapa de subsidencia diferencial tal y como puede observarse en los mapas de atributo *similarity* al tope de las Fms. Quebrada del Sapo (Fig. 60) y Quintuco (Fig. 61). Además, se identificaron una serie de fallas con componentes de rumbo y orientación ENE-OSO y ONO-ESE las cuales se indican con líneas punteadas de color rojo.

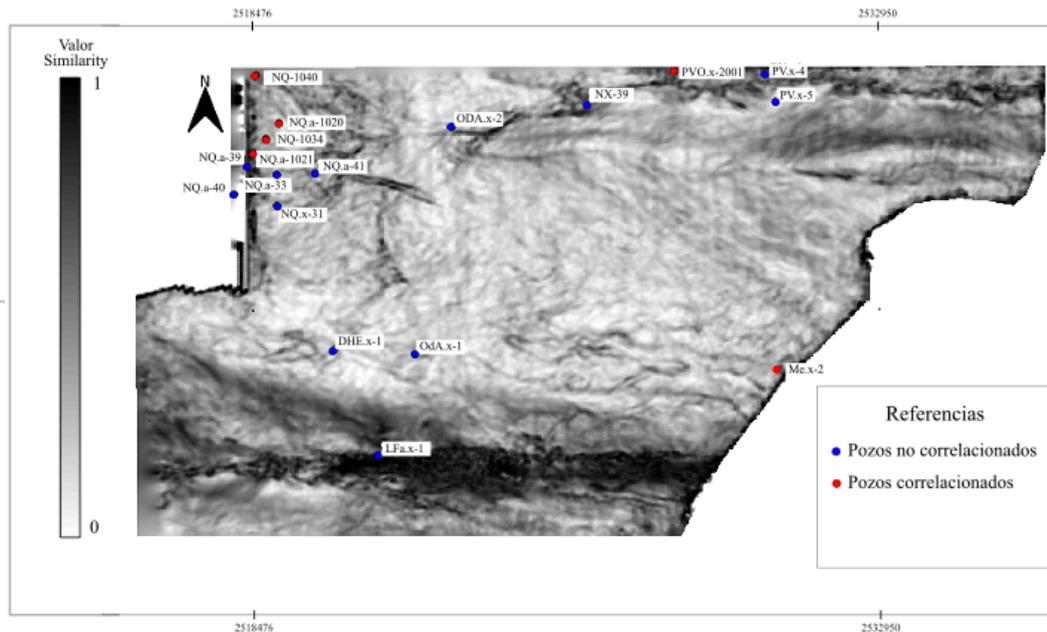



Mapa de atributo *similarity* al tope de la Formación Quebrada del Sapo
 Cuenca Neuquina-Cubo 3D Ojo de Agua
 Autor: Salvo Alexander
 Año: 2023
 Datum: 900 msnm
 SRC: POSGAR 94/Argentina 2

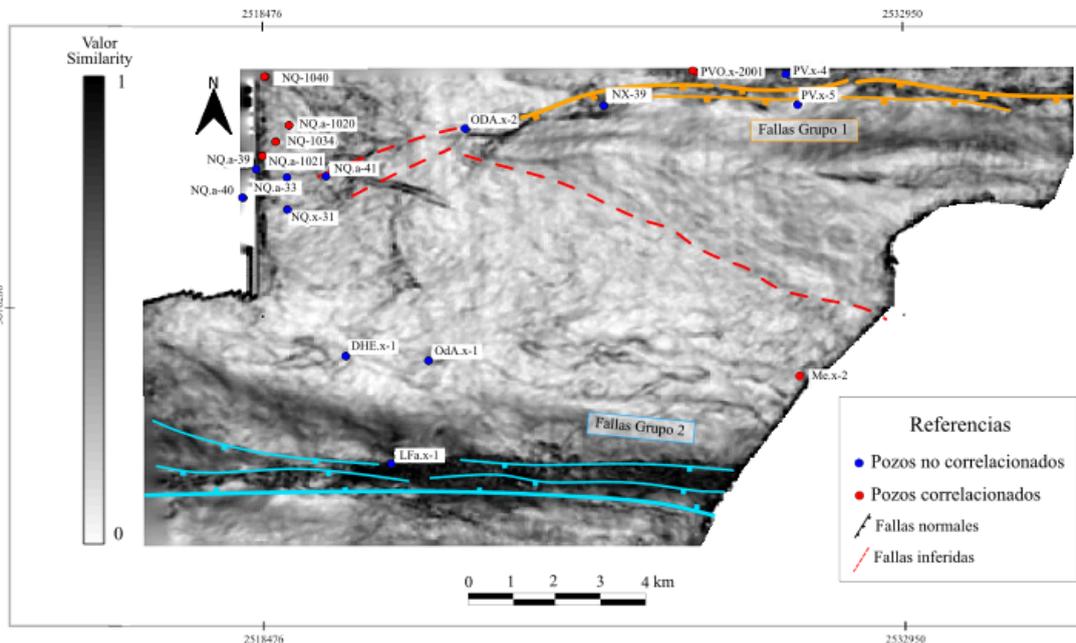



Mapa de atributo *similarity* al tope de la Formación Quebrada del Sapo
 Cuenca Neuquina-Cubo 3D Ojo de Agua
 Autor: Salvo Alexander
 Año: 2023
 Datum: 900 msnm
 SRC: POSGAR 94/Argentina 2

Figura 60. Mapa de atributo *similarity* al tope de la Fm. Quebrada del Sapo con las fallas interpretadas.



	Mapa de atributo <i>similarity</i> al tope de la Formación Quintuco	Datum: 900 msnm SRC: POSGAR 94/Argentina 2
	Cuenca Neuquina-Cubo 3D Ojo de Agua Autor: Salvo Alexander Año: 2023	



	Mapa de atributo <i>similarity</i> al tope de la Formación Quintuco	Datum: 900 msnm SRC: POSGAR 94/Argentina 2
	Cuenca Neuquina-Cubo 3D Ojo de Agua Autor: Salvo Alexander Año: 2023	

Figura 61. Mapa de atributo *similarity* al tope de la Fm. Quintuco con las fallas interpretadas.

El atributo de amplitud se calculó para aquellas unidades litoestratigráficas que presentan cierto interés petrolero en el área de estudio, como es el caso del Gr. Cuyo y las Fms. Quebrada del Sapo y Quintuco. Los mapas de amplitudes permitieron identificar aquellas zonas con cambios importantes de impedancias acústicas, lo cual se vincula a variaciones en las propiedades petrofísicas de las rocas. El atributo de amplitud se calculó para cada superficie indicada, por lo tanto, indica el valor de amplitud a lo largo de esta interfase.

Para el caso del tope del Gr. Cuyo, los sectores con bajas amplitudes (colores violetas y/o celestes) corresponden a la ubicación de las fallas del sector norte y al bloque elevado en el sector sur del área (Fig. 62). Por su parte, el sector central del volumen sísmico presenta un predominio de valores de alta amplitud (color rojo y naranja).

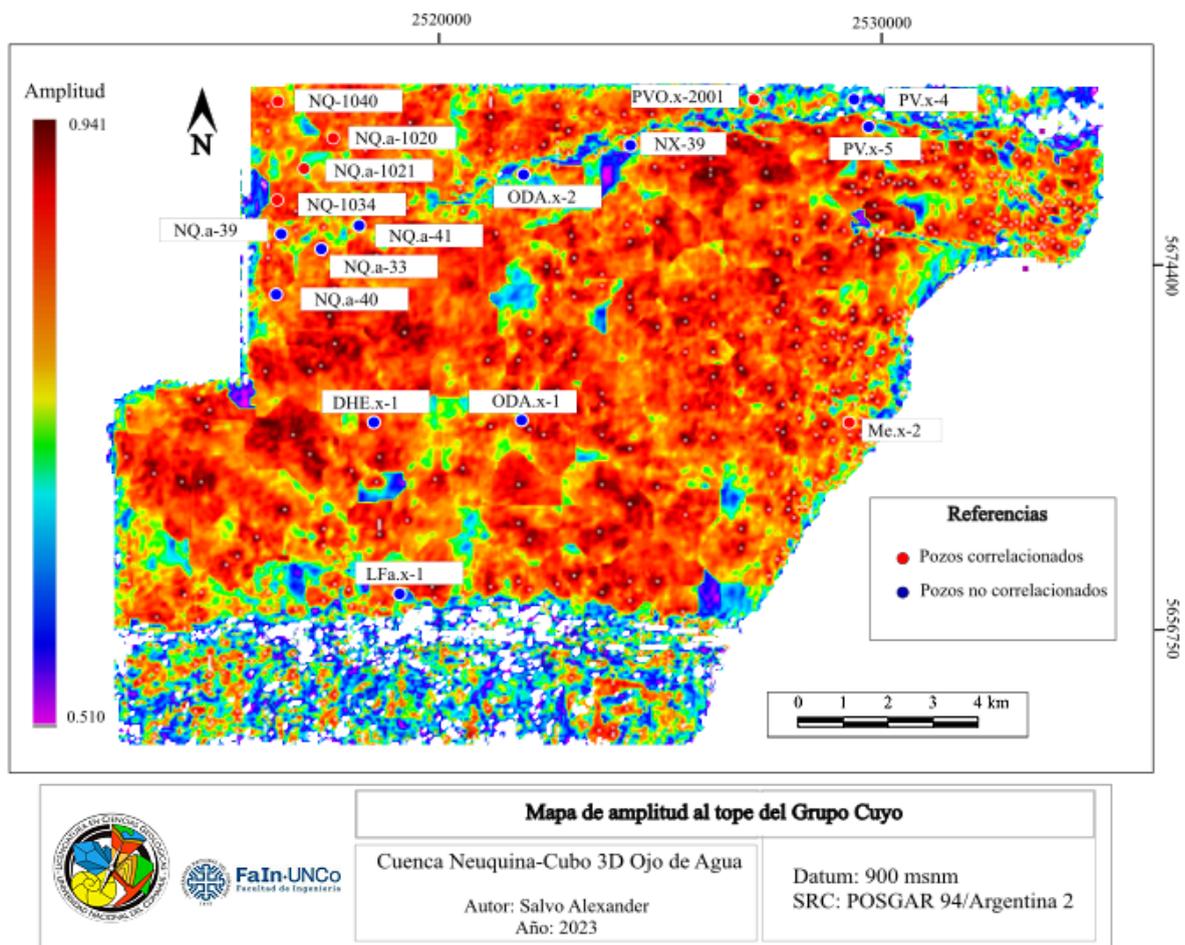


Figura 62. Mapa de amplitud al tope del Gr. Cuyo.

El mapa de amplitud al tope de la Fm. Quebrada del Sapo (Fig. 63) revela importantes disminuciones de amplitud en los rasgos estructurales mencionados previamente. Los mayores valores de amplitud (color rojo/naranja) predominan en el sector central, extendiéndose hacia el suroeste del área, siguiendo un rumbo preferencial NE-SO. Esto podría explicarse a través de una posible variación lateral de facies, debido a que la Fm. Quebrada del Sapo en este sector de la cuenca se habría depositado en un ambiente fluvial de alta energía, tal y como lo detallan los legajos de pozos.

Es importante mencionar que los valores de amplitud de esta interfase y la correspondiente al tope del Gr. Cuyo pueden encontrarse alterados ya que corresponden a dos reflectores sucesivos (como se puede ver en la Fig. 41) cuyo espesor se encuentra por debajo del límite de resolución sísmica. El espesor de la Fm. Quebrada del Sapo (tabla 4) se encuentra entre 10 y 27 m y la resolución sísmica vertical es de 18 m para este nivel. Además, si se considera una frecuencia media de 55 Hz, es equivalente a un período $T=0.018$ s o 18 ms, o sea una resolución sísmica vertical de 17,7 m quedando casi todo el mapa isocronopáquico de la Fm. Quebrada del Sapo debajo de este valor (color rojo, Fig. 57). Por lo tanto, el valor de amplitud de ambos reflectores posiblemente esté afectado por el efecto de *tuning* (Brown, 2004).

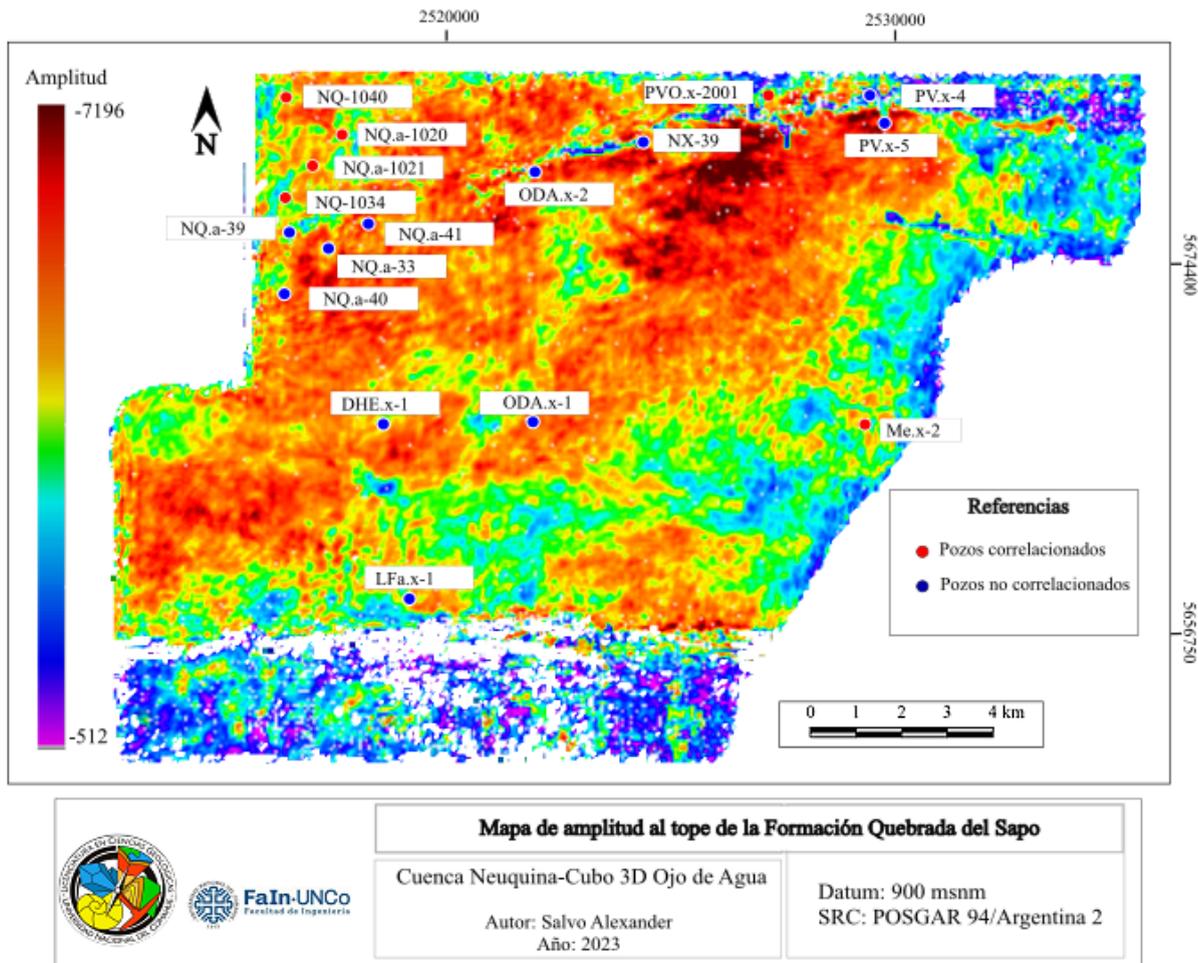


Figura 63. Mapa de amplitudes al tope de la Formación Quebrada del Sapo.

Las amplitudes al tope de la Fm. Quintuco (Fig. 64) detalla sectores puntuales caracterizados por elevados valores del atributo y con geometrías elipsoidales que se localizan desde el extremo septentrional del cubo hacia la región central.

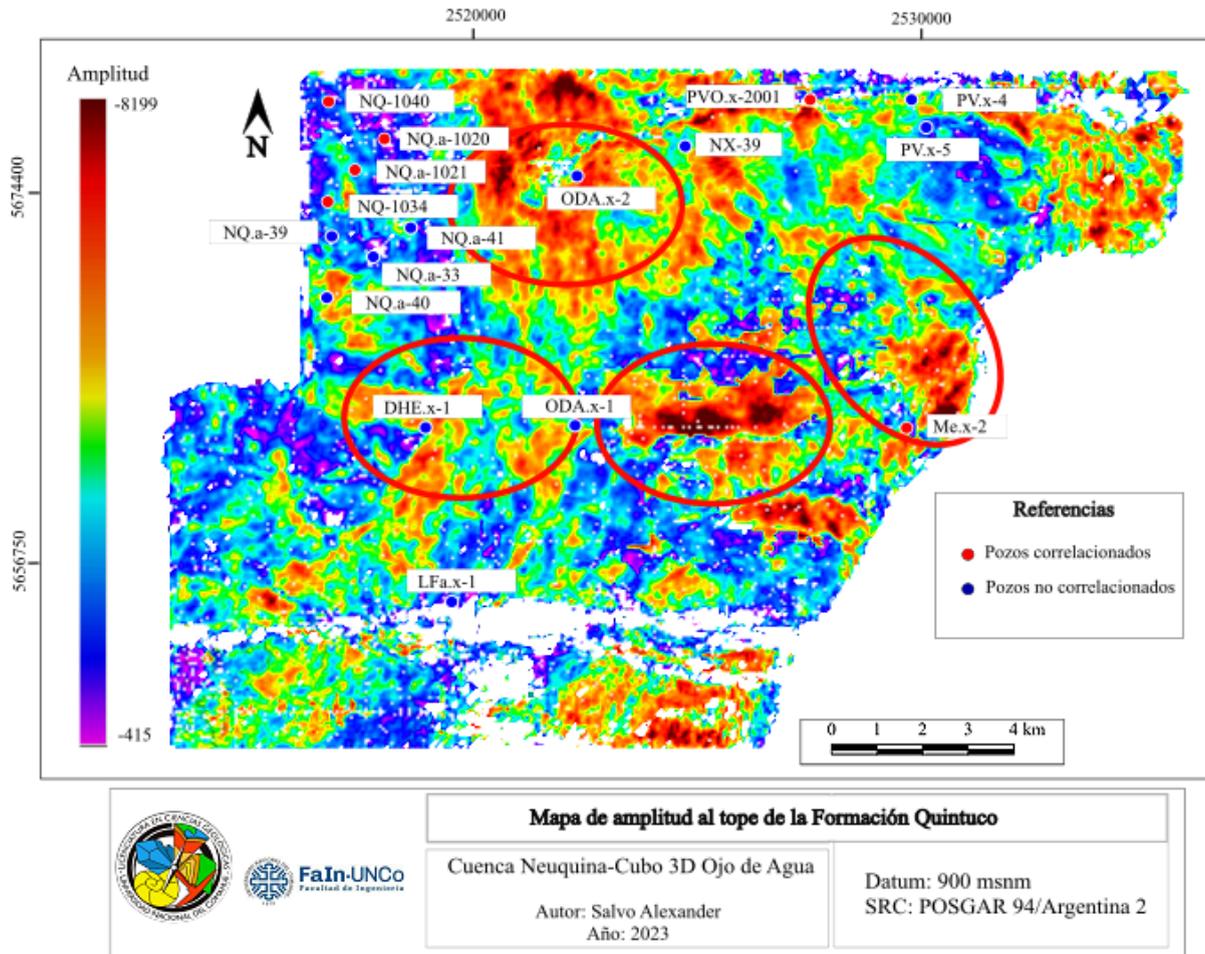


Figura 64. Mapa de amplitudes al tope de la Formación Quintuco. Los círculos de color rojo señalan las geoformas sísmicas elipsoidales.

En secciones sísmicas N-S, estos rasgos se visualizan como pequeños sobresaltos de amplitud, caracterizados por una geometría circular a elipsoidal (Fig. 65). Según lo detallado en los legajos de pozos, la Fm. Quintuco en esta porción de la cuenca, se desarrollaría en facies carbonáticas de alta energía (*packstone* y/o *wackestone*), lo cual se podría atribuir al desarrollo de una plataforma carbonática. Asimismo, interpretaciones sísmicas vinculadas al desarrollo del sistema Vaca Muerta-Quintuco, describen a estos rasgos como “abultamientos carbonáticos” los cuales se caracterizan por ser geoformas convexas con forma circular en planta y elevada amplitud debido al contraste de impedancias acústicas con los niveles supra e infrayacentes (Bande *et al.*, 2018).

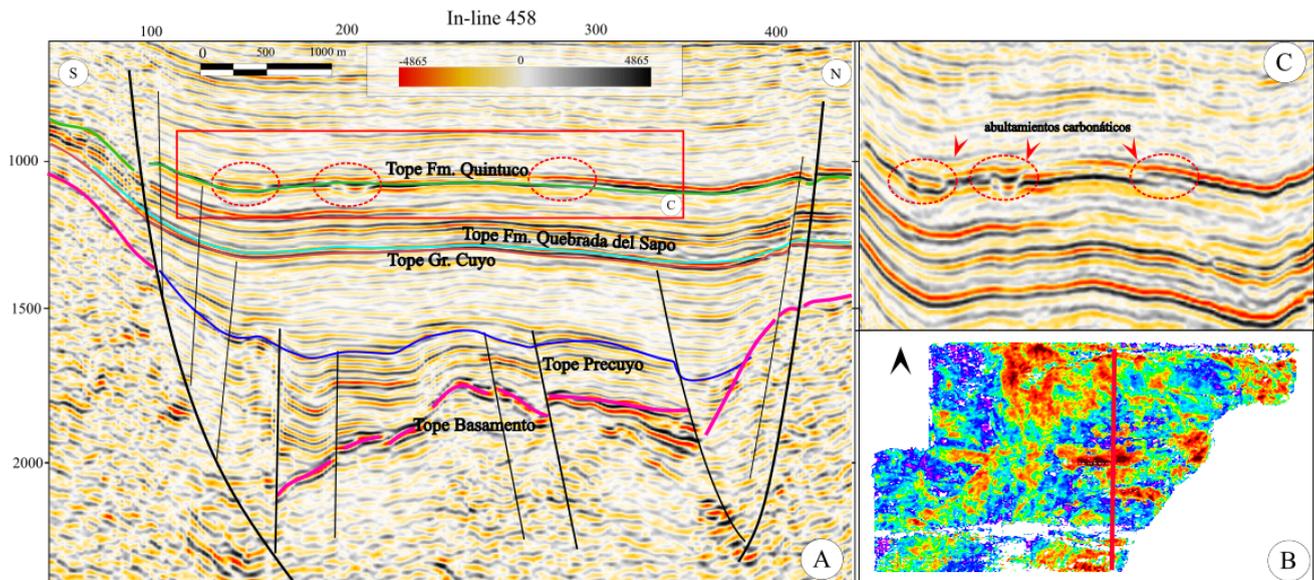


Figura 65. A) Sección sísmica N-S con los tope formacionales y fallas interpretadas (en círculo de color rojo se señalan los posibles abultamientos carbonáticos). B) Mapa de amplitudes al tope de la Fm. Quintuco (la línea de color rojo indica la orientación de la línea sísmica). C) Imagen de detalle de la imagen A (recuadro de color rojo) de los posibles abultamientos carbonáticos.

8.2 Rasgos estratigráficos y estructurales asociados al basamento

Los principales rasgos estratigráficos se encuentran asociados a diferentes discordancias, las cuales reflejan sucesivos desplazamientos de la línea de costa, controlado por los ritmos relativos de subsidencia, eustasia y sedimentación. En este sentido (Leanza, 2009) a través de estudios de superficie y recopilaciones bibliográficas, describe una primera discordancia “Discordancia Huárpica (intratriásica)” vinculada a los primeros estadios del *rifting* de la cuenca, donde las unidades basales del Precuyo comenzarían a rellenar los depocentros originados en el basamento cristalino. En el dato sísmico esto se puede observar mediante los acañamientos de la secuencia del Precuyo y a través de las terminaciones del tipo *onlap* de los reflectores sísmicos de esta unidad sobre el basamento, de carácter caótico (Fig. 66).

Al tope del Precuyo se desarrolla una segunda discordancia (Discordancia Rioatuélica) interpretada como el producto de la fase diastrófica Río Atuel la que marcaría el inicio de la primera transgresión marina procedente del océano Pacífico expresada en las sedimentitas de la base del Gr. Cuyo (Leanza, 2009). En secciones sísmicas *in-line* el contacto entre el tope del Precuyo y la secuencia basal del Gr. Cuyo se aprecia de manera discordante, siendo los reflectores del Precuyo discontinuos con importantes variaciones de amplitud, mientras que los reflectores del Gr. Cuyo se disponen con un mayor continuidad lateral en el dato sísmico (Fig. 66).

Durante el Kimmeridgiano se produciría una reactivación tectónica (Movimientos Intermálmicos o Araucánicos) dando lugar a la discordancia Araucánica (Leanza, 2009). Dicho rasgo sería producto de la reorganización de los campos de esfuerzos Mesozoicos que precedió a la fragmentación del margen sudoccidental de Gondwana y la apertura del océano Atlántico. Estos movimientos generarían la erosión de gran parte del relleno infrayacente a la Fm. Quebrada del Sapo como son las unidades del Gr. Lotena, ausente en el área de estudio y, a su vez, un registro muy acotado de esta formación. Si bien, en el registro sísmico no se observan

relaciones estratigráficas discordantes entre los reflectores sísmicos del Gr. Cuyo y la Fm. Quebrada del Sapo, es destacable la ausencia de gran parte del registro sedimentario entre ambas unidades y por tal motivo se atribuye la presencia de la discordancia Araucánica en esta interfase (Fig. 66). Un último rasgo estratigráfico a destacar corresponde a las secuencias progradantes de la Fm. Vaca Muerta, las cuales tuvieron un sentido de avance SE-NO. En la Fig. 67 se visualizan las terminaciones del tipo *downlap* y *toplap* de los reflectores sísmicos característicos de las sucesiones progradantes de esta formación.

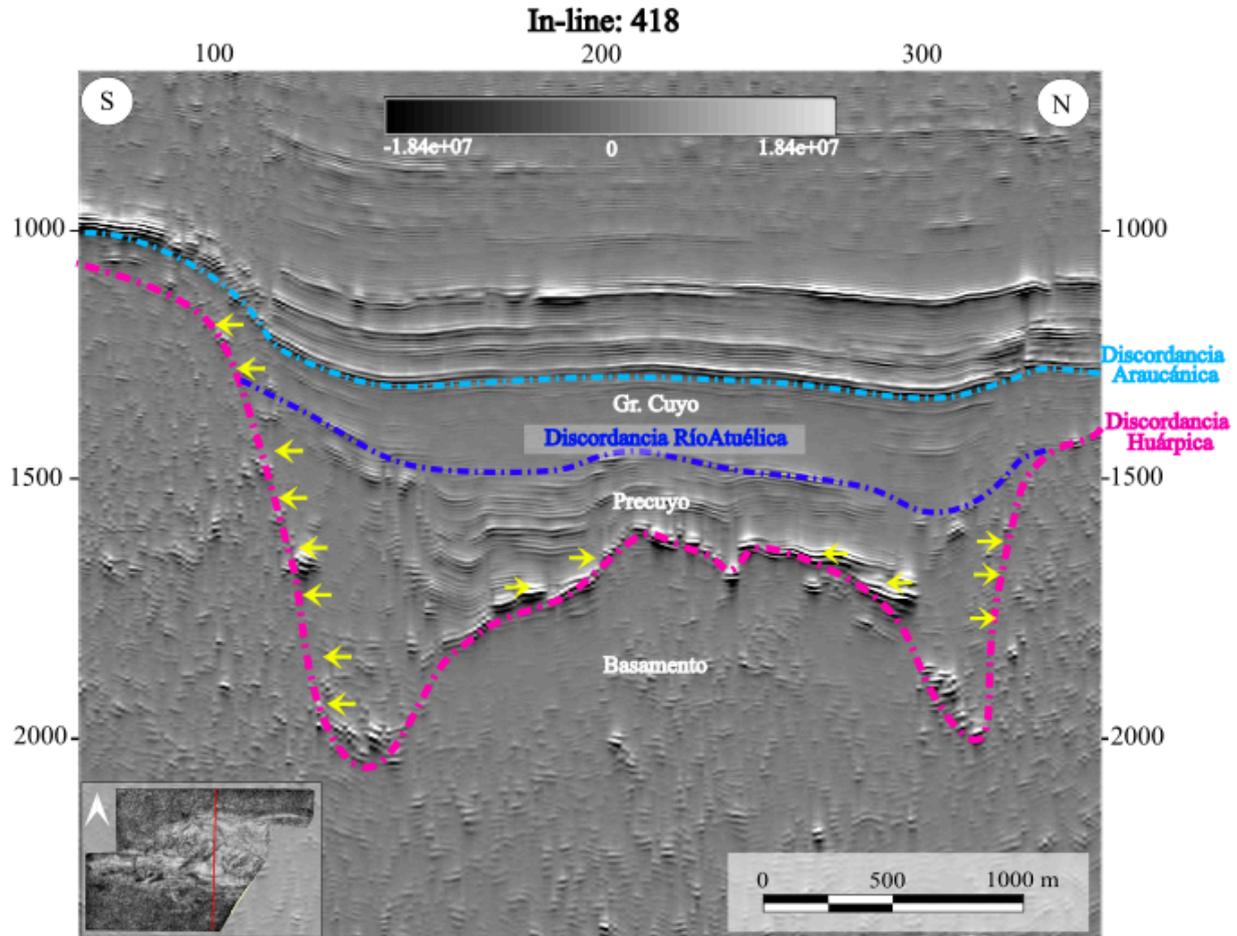


Figura 66. Sección sísmica in-line con atributo *pseudo relief* donde se señalan las principales discordancias y rasgos estratigráficos. En flechas de color amarillo se ilustran las terminaciones del tipo *onlap*.

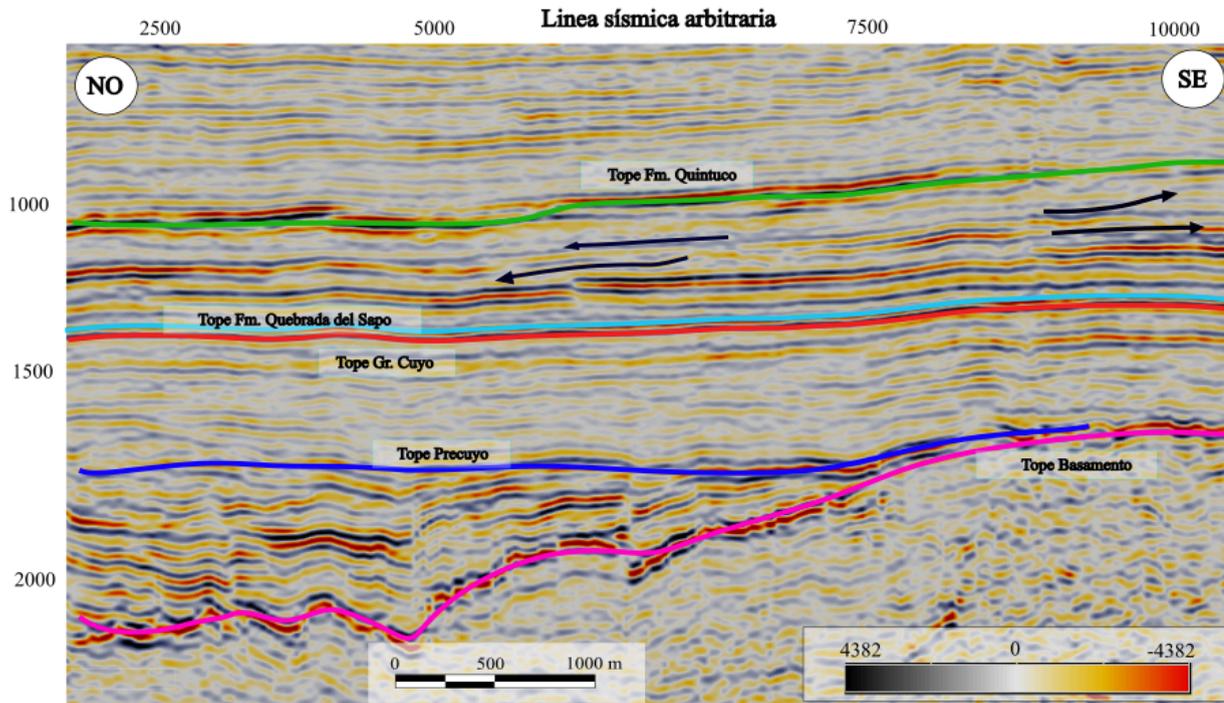


Figura 67. Sección sísmica arbitraria donde se señalan los principales rasgos estratigráficos correspondientes a las progradaciones de la Fm. Vaca Muerta. En flechas de color negro se indican las terminaciones del tipo *downlap* y *toplap* en los reflectores progradantes.

Los principales rasgos estructurales en el área fueron identificados a partir del análisis efectuado de los atributos calculados y los mapas realizados. Se identificaron cuatro zonas morfoestructurales dentro del área de estudio (Fig. 68 y Fig. 69) las cuales coinciden con la información suministrada por los legajos de pozos. A grandes rasgos estas zonas se pueden agrupar en una graben central limitado al norte y al sur por dos horsts que se observan parcialmente dentro del área de estudio.

Horst septentrional: Se encuentra localizado en el sector norte del volumen sísmico, precisamente en las concesiones de Aguada Pavón, Cerro Las Mulas-Arroyito. Corresponde al bloque yacente de una serie de fallas normales de rumbo general ENE-OSO e inclinación hacia el sur, atribuidas al Grupo 1 descrito previamente. Este rasgo fue mencionado como “pilar tectónico sobreelevado” por YPF (1977) y caracterizado como un bloque con aspecto de espolón cuyo eje hunde suavemente hacia el este delimitado por fallas directas. Este sector está caracterizado por la ausencia de los depósitos precuyanos para los cuales estableció un límite en la depositación, claramente identificado mediante la presencia de terminaciones de reflectores tipo *onlap* (Fig. 69) de los depósitos sobre el borde de basamento.

Sinclinal noreste: Se ubica hacia el sudeste del rasgo mencionado anteriormente. Corresponde a un sinclinal asimétrico limitado tanto al norte como hacia el sur por fallas normales de acomodación del bloque colgante de la falla listrica principal del Grupo 1. Presenta un eje buzante hacia el oeste y su flanco norte está compuesto por una serie de fallas paralelas “espolones o terrazas estructurales” de acuerdo con YPF (1977). Este rasgo involucra a toda la secuencia sedimentaria descrita anteriormente, presentando leves rasgos anticlinales incluso en las secuencias correspondientes a la Fm. Quintuco, posiblemente asociados a la

compactación diferencial ocurrida durante la etapa de subsidencia termal.

Alto estructural relativo: Se localiza en la parte central del volumen sísmico. Corresponde a un alto estructural relativo localizado en un graben limitado tanto al norte como hacia el sur por fallas normales antitéticas asociadas al Grupo 1 y Grupo 2. La actividad tectónica se ve reflejada principalmente en las secuencias del Precuyo y Gr. Cuyo y en menor medida en las secuencias sedimentarias suprayacentes. De acuerdo con YPF (1959 (c)) presenta una pendiente suave hacia el este, con el predominio de pequeños “espolones estructurales” con cierres en todas las direcciones.

Horst austral: Comprende la porción sur del volumen sísmico, constituido por el bloque yacente de una serie de fallas normales correspondientes al Grupo 2 mencionado con anterioridad (Fig. 68). El límite norte de esta estructura podría coincidir con el Lineamiento Borde del Limay definido por Carbone *et al.*, (2011) y Sigismondi (2013). Al igual que el Horst septentrional está caracterizado por la ausencia de los depósitos precuyanos.

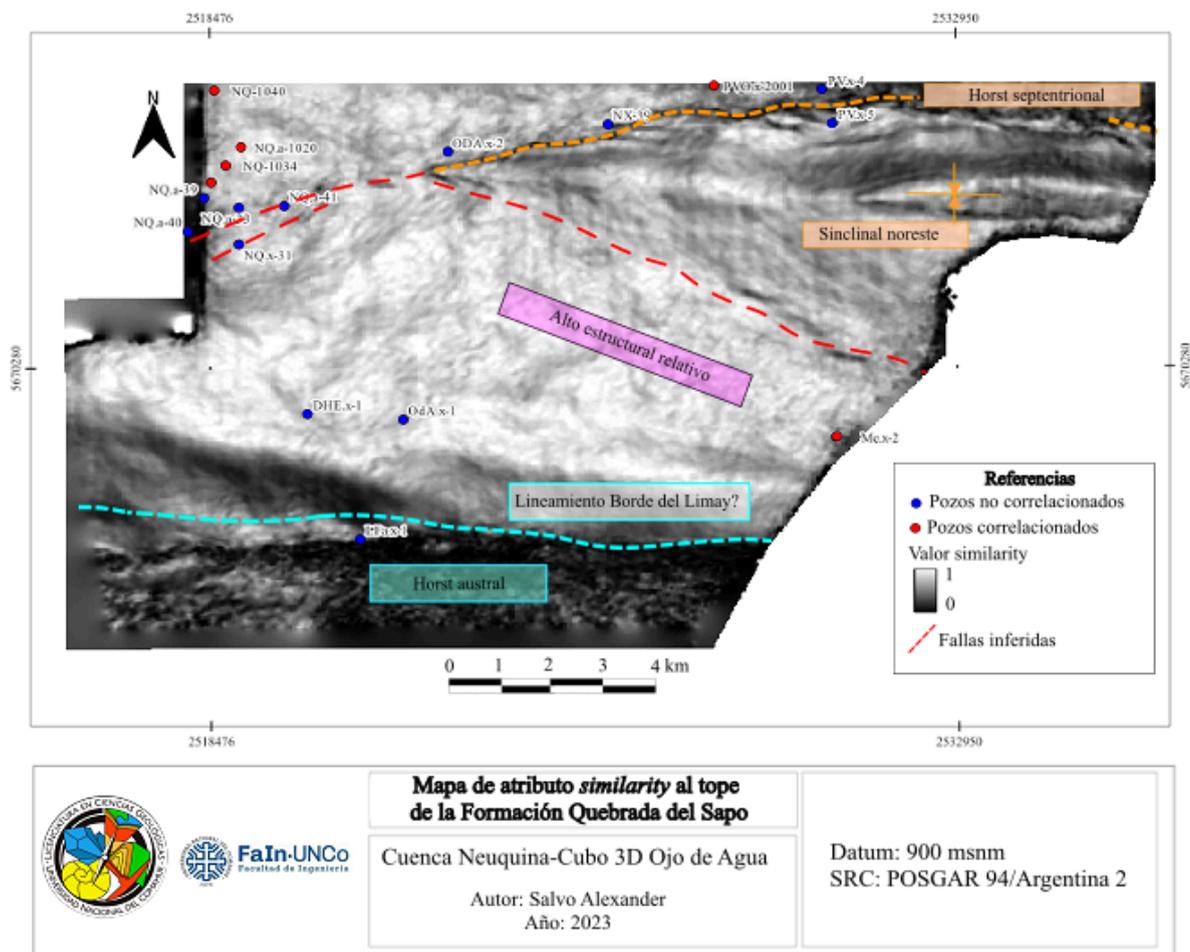


Figura 68. Mapa de atributo *similarity* al tope de la Fm. Quebrada del Sapo con límites de las zonas morfoestructurales identificadas en el área de estudio. La línea de color celeste indicaría la prolongación occidental del lineamiento precuyano Borde del Limay (Carbone *et al.*, 2011).

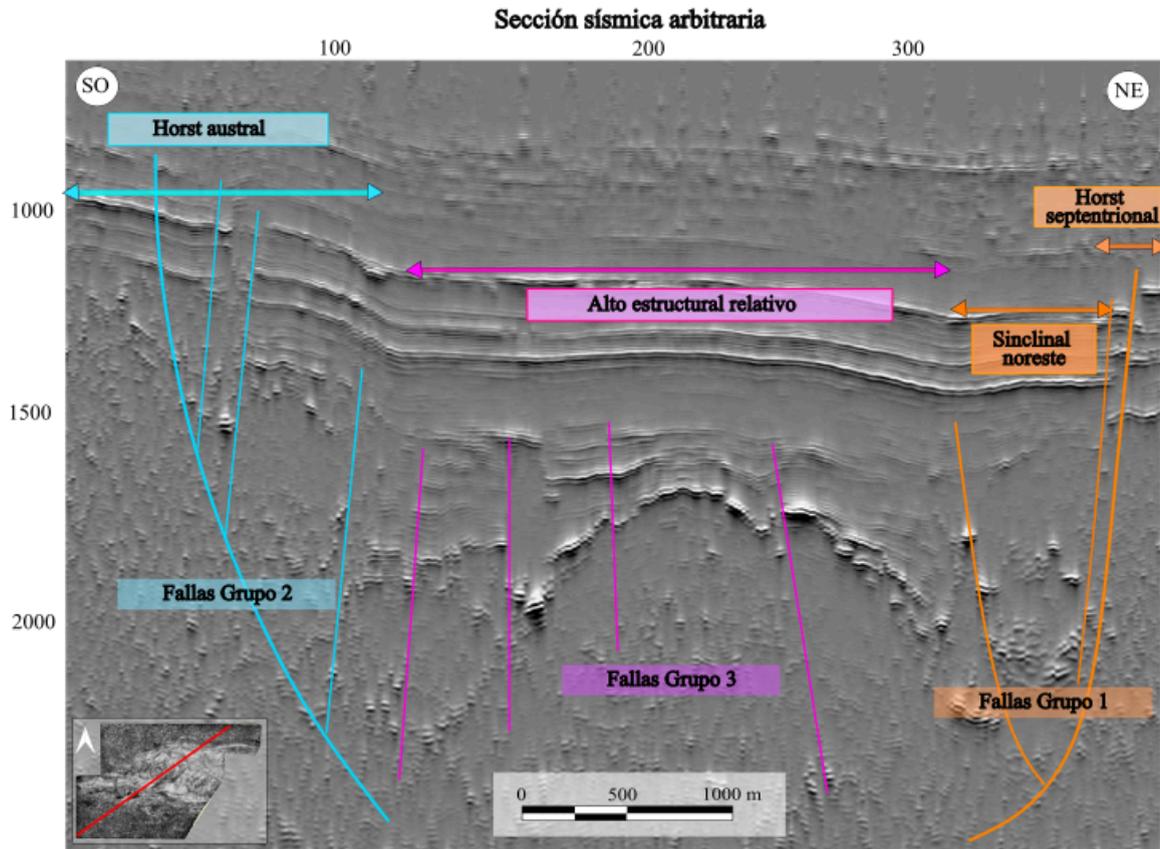


Figura 69. Sección sísmica arbitraria NE-SO con las principales zonas morfoestructurales y su relación con las fallas interpretadas en el volumen sísmico.

8.3 Identificación de zonas de interés para futuras perforaciones exploratorias

El análisis de los legajos de cada pozo permitió obtener un panorama generalizado de los principales niveles mineralizados. Se destacan dos acumulaciones convencionales de hidrocarburos. La primera de ellas se encuentra en el sector noroeste del área de estudio, donde los intervalos de producción se localizan en las Fms. Quebrada del Sapo, Quintuco y parte del Gr. Cuyo (Fm. Challacó) (*Pionner Natural Resources*, 2002) vinculada a un alto estructural identificado en los mapas isócronos al tope de estas unidades litoestratigráficas.

En la Fig. 70 se presenta un esquema generalizado de una línea sísmica arbitraria atravesando los pozos presentes en el yacimiento Divisadero General San Martín.

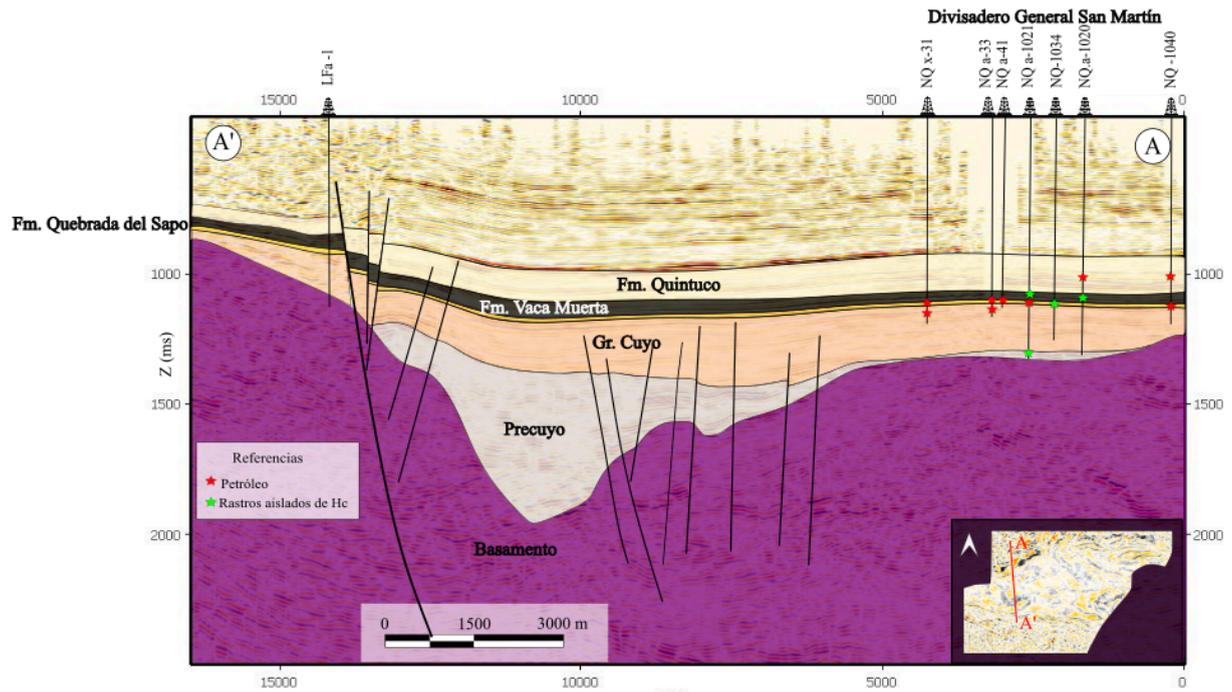


Figura 70. Línea sísmica arbitraria en la ubicación de los pozos con un esquema generalizado de la configuración estratigráfica y estructural del yacimiento Divisadero General San Martín. Las estrellas de color rojo indican los niveles productivos de petróleo mientras que las estrellas de color verde indican aquellos niveles con rastros aislados de hidrocarburos.

Una segunda acumulación se localiza en el yacimiento Aguada Pavón / Cerro Las Mulass, inmediatamente al este de Divisadero General San Martín, siendo productivo el pozo PVO.x-2001 en los niveles de la Fm. Quebrada del Sapo (Petrolera Pampa, 2014). Particularmente, se encontraría en el horst septentrional mencionado previamente, limitado al sur por las fallas correspondientes al grupo 1 (Fig. 71). Sin embargo, estas acumulaciones están desvinculadas entre sí a través de una fractura en sentido NE-SO (YPF, 1958 y Petrolera Pampa, 2014) la cual podría correlacionarse con las fallas transcurrentes de igual orientación descritas con anterioridad.

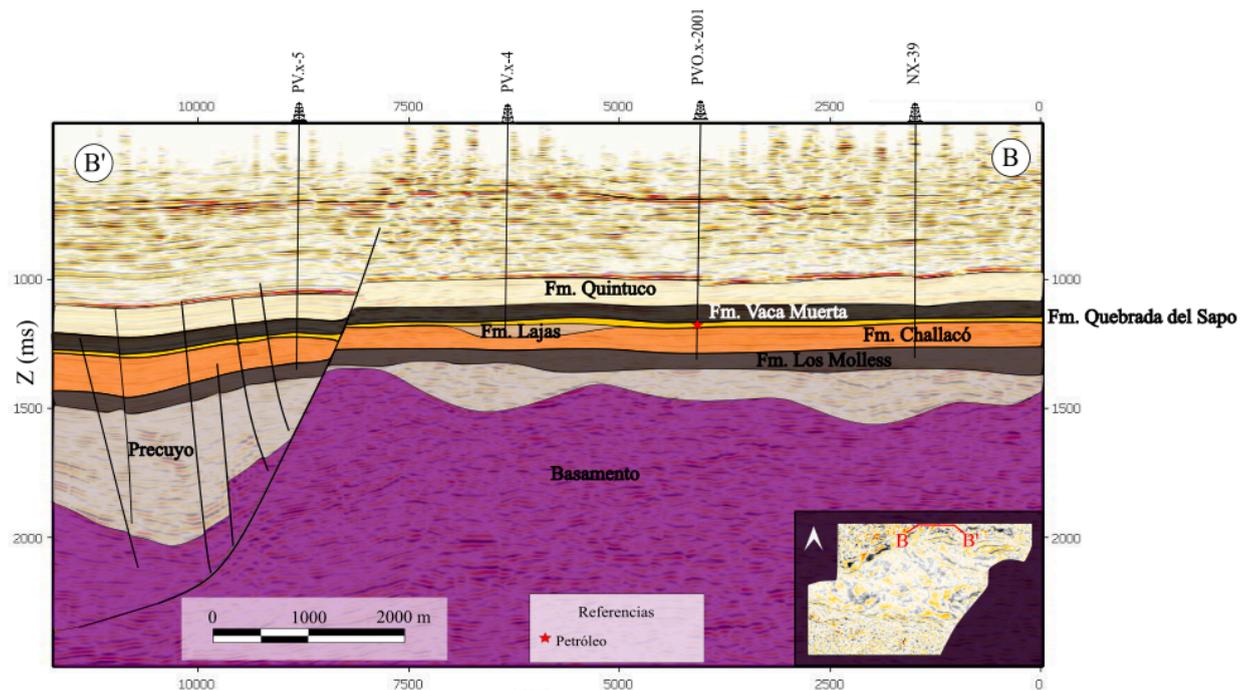


Figura 71. Línea sísmica arbitraria con un esquema generalizado de la configuración estratigráfica y estructural de la zona Aguada Pavón/ Cerro Las Mulas. El pozo descubridor estaría en producción en los niveles de la Fm. Quebrada del Sapo (estrella de color rojo).

Por otra parte, el sector central y austral del área presentan escasas condiciones hidrocarburíferas a pesar de encontrar espesas secuencias sedimentarias de las principales rocas reservorios del área (YPF, 1959 (b)). Ninguno de los pozos realizados en esta zona fue descubridor de niveles mineralizados. Solo en el pozo Oda.x-1 se encontraron rastros aislados de hidrocarburos en la Fm. Quebrada del Sapo y Gr. Cuyo (*Pionner Natural Resources*, 2006) (Fig. 72).

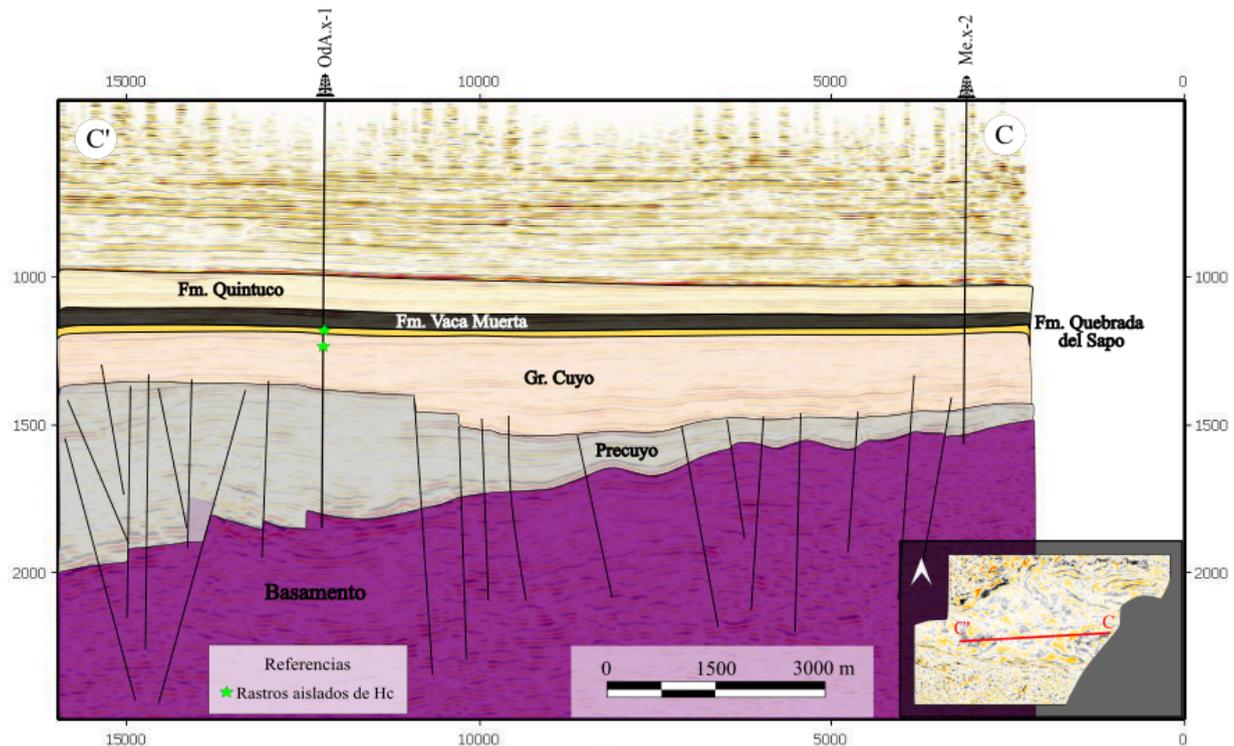


Figura 72. Línea sísmica arbitraria en la ubicación de los pozos con un esquema generalizado de la configuración estratigráfica y estructural de la zona Puesto Mellao y Ojo de Agua. Las estrellas de color verde indican los niveles en los que se encontraron rastros aislados de hidrocarburos en el pozo Oda.x-1.

En tiempos recientes se han llevado a cabo numerosos trabajos de investigación para el desarrollo de reservorios no convencionales. Uno de los reservorios no convencionales por excelencia en la Cuenca Neuquina corresponde a la Fm. Vaca Muerta, la cual se encontraría en ventana de generación de petróleo negro en la zona de estudio (Fig. 13).

Con el objetivo de prospeccionar nuevas zonas a desarrollar en esta formación se analizaron dos secciones arbitrarias utilizando en dicho análisis perfiles *gamma ray*, los cuales indicarían potencialmente aquellos intervalos con un mayor contenido de materia orgánica para el intervalo correspondiente a la Fm. Vaca Muerta.

Los perfiles de *gamma ray* de los pozos PVO.x-2001 (Petrolera Pampa, 2014), NQ.a-1020 (Pioneer Natural Resources, 2002) y NQ-1034 (Pioneer Natural Resources, 2003) presentan valores elevados en el intervalo basal de la Fm. Vaca Muerta (Fig. 73). Precisamente, el intervalo basal de esta formación es denominado informalmente como “cocina” en la industria hidrocarbúfera, debido al gran contenido de materia orgánica (TOC) (Reijenstein *et al.*, 2014). La zona analizada se encuentra en la porción septentrional del cubo, específicamente dentro del horst septentrional descrito previamente (ver apartado 8.2) lo cual sería favorable desde el punto de vista estructural, evitando la zona con presencia de fallas.

Asimismo, las descripciones de *cuttings* de los pozos mencionados permiten promover a esta zona como óptima para el desarrollo no convencional debido a que describen a este intervalo basal de la Fm. Vaca Muerta con buenas propiedades petrofísicas de roca generadora. Además, los pozos NQ.a-1020 y NQ-1034 ubicados dentro del yacimiento Divisadero General San Martín, fueron descubridores de petróleo en la Fm. Quebrada del Sapo y registraron rastros aislados de hidrocarburos en la Fm. Vaca Muerta (*Pionner Natural Resources*, 2002 y *Pionner Natural Resources*, 2003) lo cual permite inferir una posible migración desde esta unidad hacia la sucesión suprayacente.

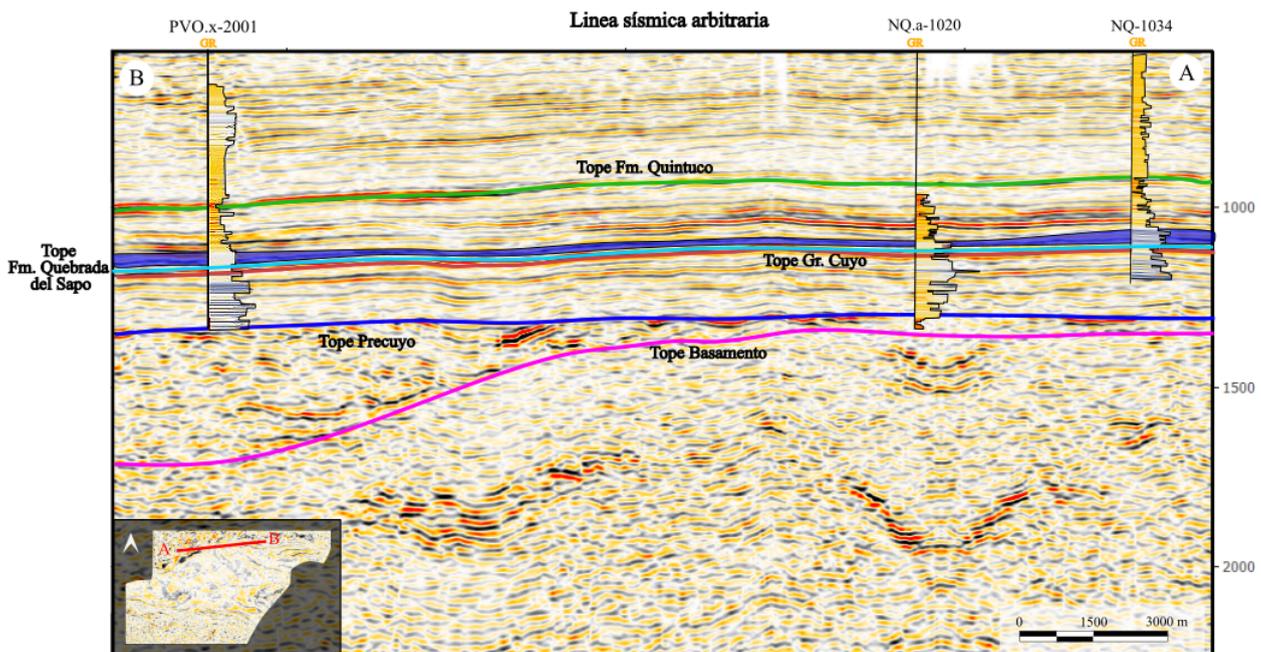


Figura 73. Sección sísmica arbitraria con perfiles de *gamma ray* correlacionados entre pozos. En color azul se ilustran los niveles con mayor valor de *gamma ray* en la Fm. Vaca Muerta.

La Fm. Los Molles puede ser considerada como un segundo reservorio no convencional. Si bien el mapa de ventanas de generación de la Fm. Los Molles (Fig. 14) afirma que esta unidad no se encontraría presente en la zona de estudio, los legajos de los pozos PVO.x-2001 (Petrolera Pampa, 2014), NX-39 (YPF, 1958), ALN-1 (YPF, 1959 (a)), LFa.x-1 (YPF, 1959 (b)), Me.x-2 (YPF, 1959 (c)), han determinado la presencia de esta unidad caracterizándose como una sucesión alternante de arcillas con material carbonoso y abundante restos vegetales, oscuras a grisáceas con areniscas y conglomerados grisáceos a blanquecinos. Esta sucesión en el dato sísmico puede subdividirse en dos secciones. Una secuencia basal, donde los reflectores sísmicos se disponen con un arreglo retrogradante lo cual indicaría las primeras inundaciones jurásicas en la cuenca y un segundo intervalo, caracterizado por una secuencia progradante, donde los reflectores sísmicos mantienen una configuración sigmoidal (Fig. 74).

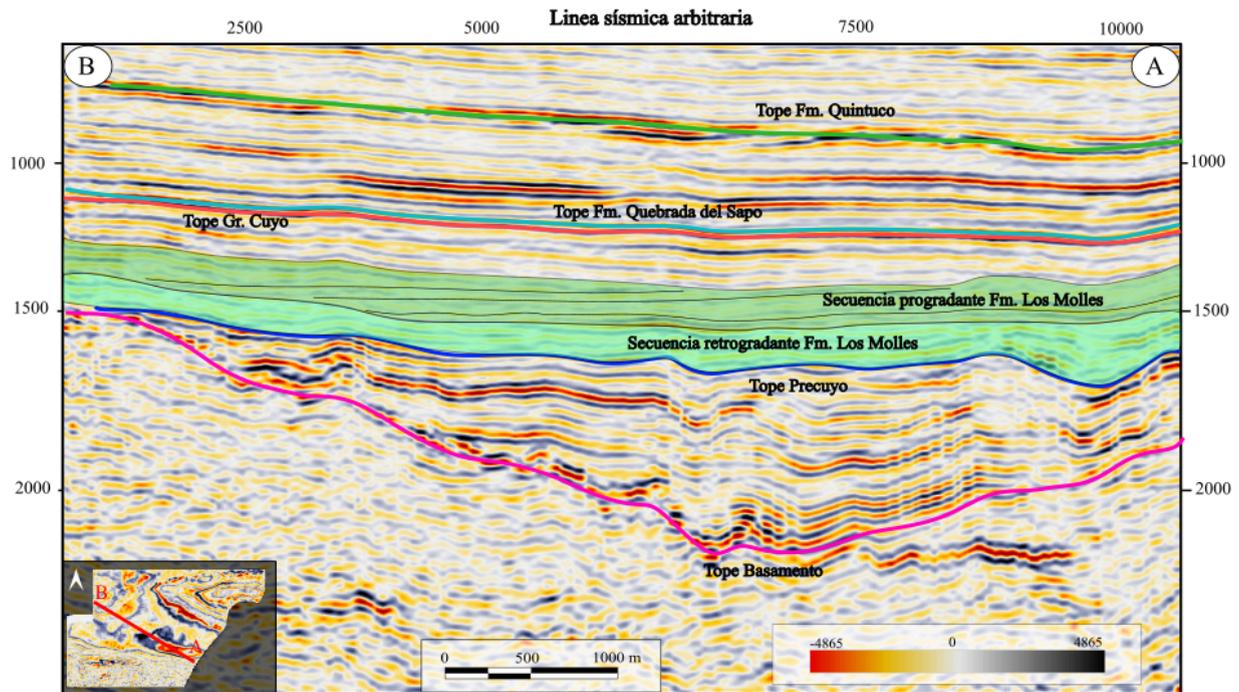


Figura 74. Sección sísmica arbitraria donde se interpretan los intervalos de la Fm. Los Molles según Jorgensen *et al.*, (2013).

El análisis efectuado con los perfiles de *gamma ray* indica la presencia de dos posibles zonas propicias para el desarrollo no convencional en esta formación. La primera de ellas se ubica en la zona morfoestructural denominada previamente como “horst septentrional” donde los valores elevados de *gamma ray* estarían ubicados en el intervalo basal y medio (secuencia retrogradante) de la Fm. Los Molles (Fig. 75).

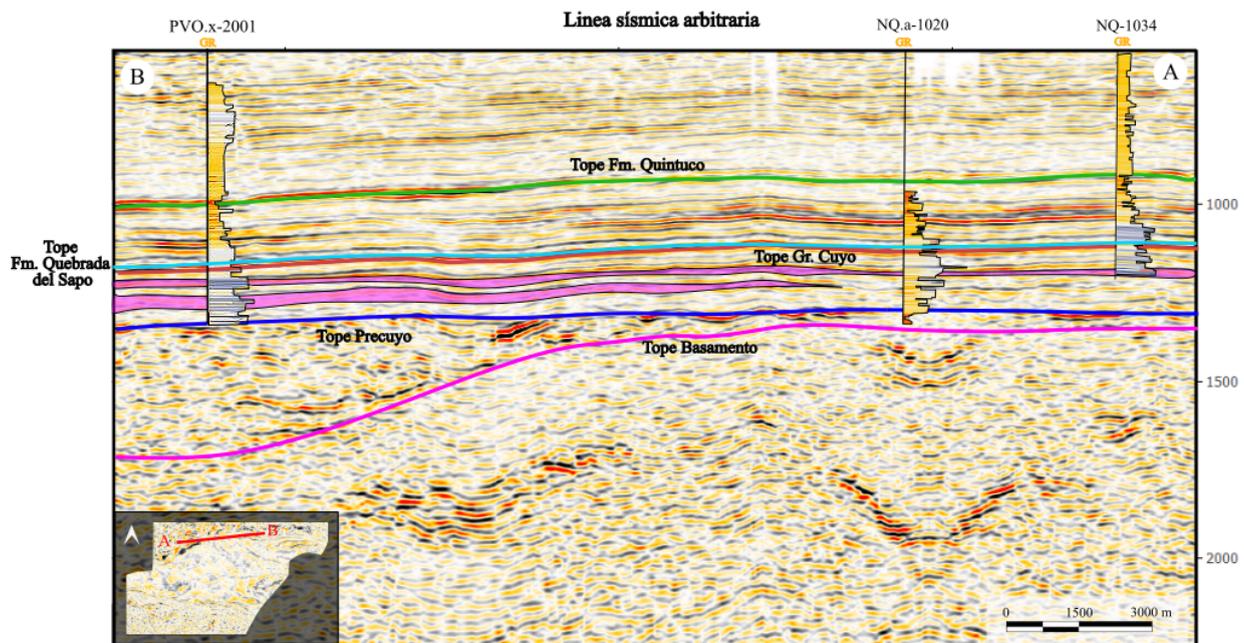


Figura 75. Sección sísmica arbitraria con perfiles de *gamma ray* correlacionados entre pozos. En color violeta se ilustran los niveles con mayor *gamma ray* en el Gr. Cuyo (Fm. Los Molles).

Una segunda zona a prospectar se ubicaría en el sector central del volumen sísmico. Particularmente esta zona alberga los mayores espesores de toda la sucesión sedimentaria mesozoica y los mayores valores de *gamma ray* se encuentran en los niveles progradantes de la Fm. Los Molles (Fig. 76). Los intervalos mencionados en esta unidad coinciden con las descripciones y caracterizaciones de esta formación como un reservorio no convencional del tipo shale gas al norte de la Dorsal de Huincul (Jorgensen *et al.*, 2013), donde se discriminan 2 intervalos con valores de *gamma ray* elevados pero con diferentes rangos de TOC. Un intervalo superior con valores de TOC por debajo del 1% denominado Molles Superior y un intervalo basal, “Molles generador” con un TOC entre 1 y 3%.

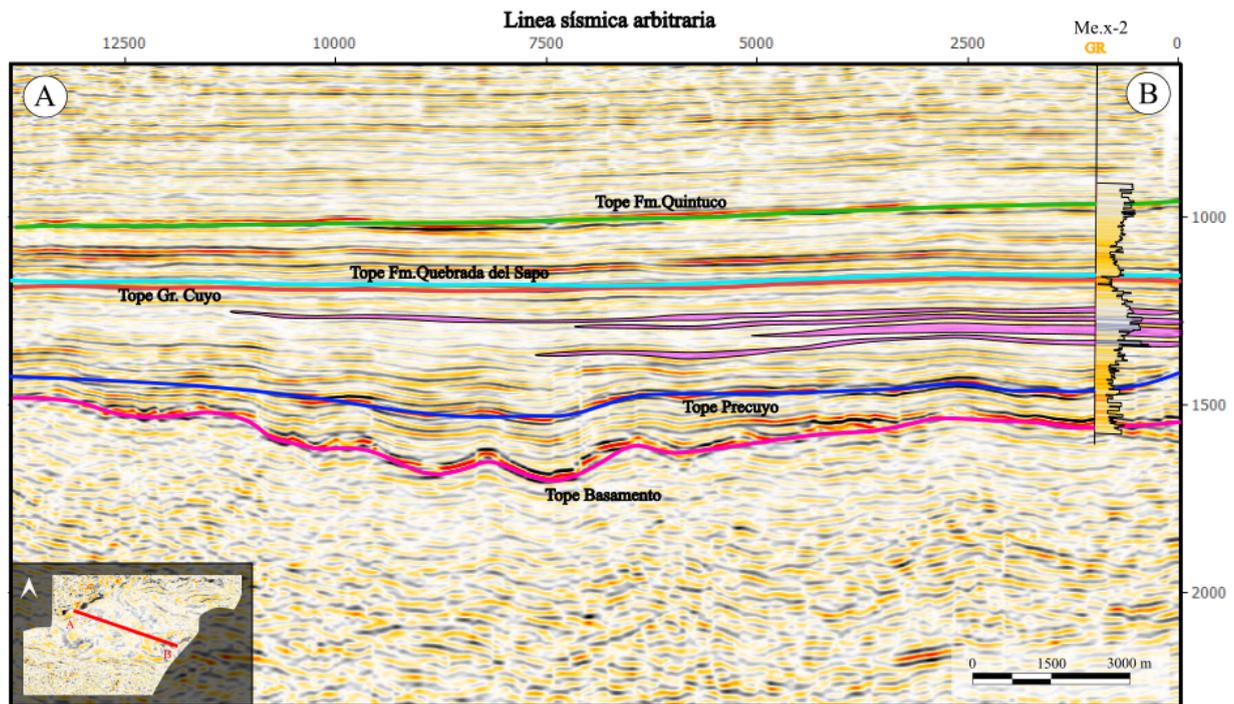


Figura 76. Sección sísmica arbitraria con perfiles de *gamma ray* correlacionados entre pozos. En color violeta se ilustran los niveles con mayor *gamma ray* en el Gr. Cuyo (Fm. Los Molles).

En base al análisis realizado, se proponen dos posibles zonas de interés para futuras prospecciones de detalle, tanto convencionales como no convencionales, ambas en el sector norte del área de estudio (Fig. 77).

La primera de estas zonas se ubicaría en la porción noroeste del volumen sísmico, dentro de la zona morfoestructural denominada pilar tectónico sobreelevado. El objetivo sería continuar con el desarrollo convencional de la zona Divisadero General San Martín. Las unidades de interés se atribuyen a las Fms. Quebrada del Sapo y Challacó (Gr. Cuyo) debido al gran potencial hidrocarburífero de las mismas en la zona de Divisadero General San Martín.

La segunda zona a prospectar se ubicaría en el sector norte del volumen sísmico, también dentro del pilar tectónico sobreelevado. El principal objetivo se centraría en el desarrollo no convencional de la Fm. Vaca Muerta presentando esta unidad los mayores valores en los registros de *gamma ray* desde el pozo PVO.x-2001 hacia la zona de Divisadero General San Martín donde se ubican los pozos NQ.a-1020 y NQ-1034 (Fig. 77). Un segundo objetivo de interés para futuras exploraciones se encontraría en las secuencias basales de la Fm. Los Molles.

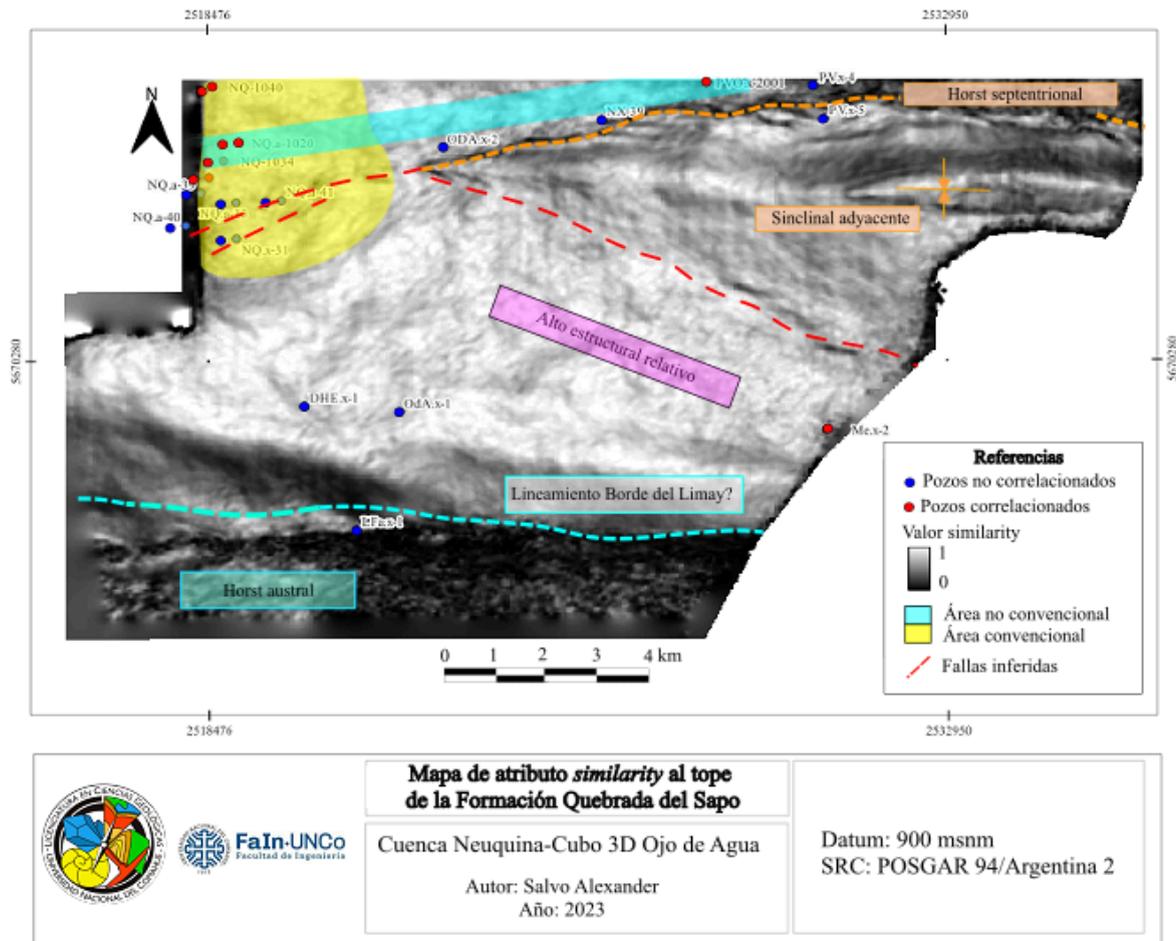


Figura 77. Mapa de atributo *similarity* al tope de la Fm. Quebrada del Sapo con las principales zonas morfoestructurales. En color amarillo se ilustra la zona convencional a prospectar con mayor detalle y en color celeste se señala la posible zona no convencional a prospectar.

8.4 Modelo geológico

Con el análisis realizado a través de la recopilación bibliográfica y la elaboración de mapas isócronos, isocronopáquicos, cálculo de atributos, interpretación de fallas y reflectores sísmicos, se logró realizar un modelo geológico del área de estudio (Fig. 78).

Las principales estructuras que controlaron el relleno sedimentario mesozoico se habrían desarrollado en la etapa extensional de la cuenca durante el Triásico Superior-Jurásico Inferior a través de un campo de esfuerzos donde el esfuerzo mínimo en dirección NNE-SSO estuvo asociado a la generación de las principales estructuras de orientación ONO-ESE que describen un graben limitado por los bloques yacientes al norte y sur del área, los cuales se vinculan a las fallas lítricas correspondientes a los Grupos 1 y 2. El bloque central está afectado por fallas de acomodación que definen un alto estructural relativo (grupo de fallas 3). La presencia de tres familias de fallas con diferentes orientaciones sugiere el mecanismo de un rift polifásico con una rotación del campo de esfuerzos entre fases extensivas (Giambiagi *et al.*, 2009).

Los estadios iniciales de depositación de la cuenca habrían comenzado con una potente secuencia volcano-sedimentaria (Precuyo) y los estadios iniciales de depositación del Gr. Cuyo, durante la etapa inicial de *syn-rift* (Triásico Superior – Jurásico Inferior) (Fig. 78 a). El relleno sedimentario se habría desarrollado cubriendo el graben central, asociado a geometrías

de cuñas sedimentarias tanto al norte como al sur del alto relativo que subdivide al depocentro en 2 hemigrábenes tal como se puede visualizar en diferentes secciones sísmicas (Fig. 45 y Fig. 48). Durante esta etapa, el vector de convergencia de la placa de Aluk por debajo de la sudamericana (gondwánica) presentaba una dirección noroeste, sin embargo no se encontraron evidencias que indiquen su influencia en las estructuras de la zona de estudio.

La etapa *post-rift* (Jurásico Medio-Superior) comenzó en concomitancia a los intervalos medios de depositación del Gr. Cuyo (Fig. 78 b). La zona de mayor subsidencia y acomodación se desarrolló en la zona central del área albergando los mayores espesores de la secuencia depositacional. Sin embargo, las variaciones de espesores del Gr. Cuyo (Fig. 56) en la región sugieren aún una influencia de la tectónica extensional en las etapas póstumas del *rifting* asociados a posibles movimientos de rumbo, presentes hasta la depositación de la Fm. Quintuco (Fig. 54 y Fig. 61).

El límite Jurásico Superior-Cretácico Inferior estuvo caracterizado por una segunda sucesión de *post-rift*, en la cual se habría desarrollado el sistema Quintuco-Vaca Muerta en un escenario de subsidencia termal (Fig. 78 c). Los mayores espesores de esta secuencia se encuentran en la zona central del volumen sísmico generando hacia el sur importantes acunamientos contra las estructuras mencionadas (Fig. 58).

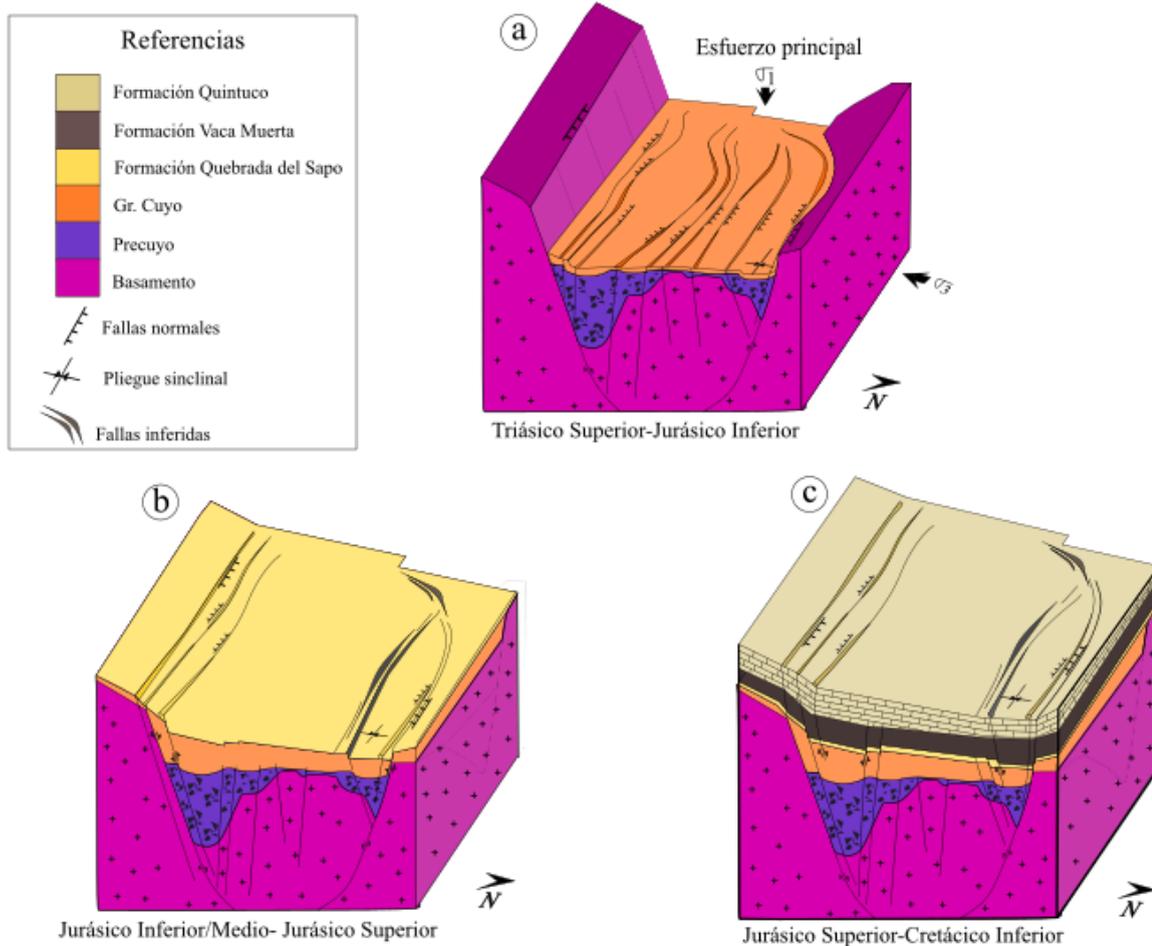


Figura 78. Modelo geológico de la zona de estudio.

9. CONCLUSIONES

A continuación se detallan las principales conclusiones a las que se arribó durante el desarrollo del presente estudio:

- La fase del dato sísmico, en base a los promedios de las correlaciones establecidas con los datos de pozos, posee un valor cercano a 135 Hz. Sin embargo se observaron variaciones importantes en todo el volumen sísmico, lo cual no permite establecer cuál es la fase del dato sísmico en base a este análisis.
- El cálculo de resolución sísmica permitió determinar que el espesor de la Fm. Quebrada del Sapo se encuentra por debajo del límite de resolución sísmica, por lo cual es probable la existencia de efecto de *tuning*.
- La elaboración de mapas isócronos permitió identificar dos altos estructurales o horst y un alto relativo (dentro del graben principal), que limitan dos depocentros con geometrías de hemigrábenes. El hemigraben norte se asocia a una falla normal lítrica, buzante al sur, de rumbo ESE-ONO, mientras que el hemigraben austral se asocia a una falla normal lítrica de igual rumbo que la anterior, pero que buzante al norte. La región central conforma un alto relativo en el basamento, con una importante sucesión de fallas directas de acomodación que se mantuvieron activas durante la depositación del Precuyo, evidenciando geometrías del tipo *onlap* entre los reflectores precuyanos y del basamento.
- Los mapas isocronopáquicos permitieron identificar importantes variaciones de espesores en los diferentes estadios evolutivos del relleno mesozoico. Los primeros indicios del relleno de la cuenca comenzarían con la depositación del Precuyo en hemigrábenes, durante la etapa de *syn-rift*. A partir del Jurásico Medio hasta el Cretácico Inferior la sedimentación se desarrolló en un depocentro generalizado enmarcada por la etapa de *post-rift*. Todas las sucesiones depositacionales presentan un acuñamiento sobre el alto estructural austral.
- El cálculo de los atributos *similarity* y *pseudo relief* ratificaron la existencia de las numerosas fallas existentes en el área, además permitieron identificar y describir cuatro zonas morfoestructurales de interés, las cuales coinciden con rasgos mencionados en legajos de pozos. La falla directa lítrica presente en el sector austral correspondería a un lineamiento precuyano denominado como lineamiento Borde del Limay según Carbone *et al.*, (2011).
- El atributo de amplitud fue de utilidad para ratificar la presencia de fallas y obtener una imagen de los cambios en las propiedades físicas de las distintas unidades litoestratigráficas. Para el caso de la Fm. Quintuco se destacan rasgos estratigráficos con elevada amplitud, posiblemente asociados a abultamientos carbonáticos, que requieren un mayor análisis en próximos estudios.

- La principal concentración convencional de hidrocarburos se encuentra en el sector noroeste del área, en la zona Divisadero General San Martín, dentro del horst septentrional.
- Las principales rocas reservorios convencionales corresponden a las Fms. Quebrada del Sapo, Challacó (Gr. Cuyo) y Quintuco. La roca generadora se encontraría en los niveles basales de la Fm. Vaca Muerta.
- Con la existencia de rastros de hidrocarburos principalmente en la Fm. Vaca Muerta dentro del área Aguada Pavón, se presume una posible migración de hidrocarburos hacia la zona de Divisadero General San Martín, cargando de esta manera los reservorios de la Fm. Quebrada del Sapo y Gr. Cuyo. A su vez, es posible una migración desde parte del centro de cuenca hacia esta zona. La presencia de numerosas fallas normales, en conjunto con variaciones de facies e importantes reactivaciones tectónicas y erosiones (discordancias) fueron los mecanismos responsables de la migración, entrapamiento y almacenamientos de hidrocarburos en la zona.
- Se establecieron zonas con posible potencial para el desarrollo no convencional atribuidas por valores elevados del registro *gamma ray*, rastros de hidrocarburos y condiciones estructurales aceptables.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre Urreta, M.B. y Rawson, P.F. 2001. Lower Cretaceous ammonites from the Neuquén Basin, Argentina: a Hauterivian *Olcostephanus* fauna. *Cretaceous Research* 22: 763-778.
- Alonso, M. 2016. Caracterización geológica de la Formación Rayoso y del Subgrupo Río Limay (Grupo Neuquén) y su relación con las aptitudes hidrogeológicas en el sector centro-norte de la provincia del Neuquén. Neuquén, Argentina.
- Armas, P. y Sánchez, M. L., 2013. Sedimentología y arquitectura de las dunas costeras de la Formación Allen, Grupo Malargüe, cuenca Neuquina. Río Negro, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30 (1): 65-79.
- Arregui, C., Carbone, O., Leanza, H.A. 2011. Contexto tectosedimentario. XVIII Congreso Geológico Argentino. Relatorio, Neuquén 2011. 29-35 p.
- Bande, A., Acevedo, H., Bagdo, P., Mosquera, A. y Veiga, R. 2018. Variaciones deposicionales del sistema Vaca Muerta-Quintuco en el sector central de la Cuenca Neuquina: Ejemplos del área Fortín de Piedra. En: 10° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Recursos No Convencionales: Hacia una Nueva Convención. Buenos Aires, Argentina.
- Brown Alistair, 2004. Interpretation of three-dimensional seismic data, capítulo 6: Tuning Phenomena in Reservoirs. Sixth edition. AAPG Memoir 42.
- Capelli, I.A, Scasso, R.A, Kietzmann, D.A, Cravero, M.F, Minisini, D. y Catalano, JP. 2018. Tendencias mineralógicas y geoquímicas del sistema Vaca Muerta-Quintuco en el tramo Puerta Curaco, Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* , 75 .
- Carbone, O., Franzese, J., Limeres, M., Delpino, D., y Martínez, R. 2011. El Ciclo Precuyano (Triásico Tardío-Jurásico Temprano) en la Cuenca Neuquina. *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires* , 63-75.
- Cátedra de Geofísica UNCo. 2021. Apunte de cátedra inédito.
- Cingolani C., Zanettini J. y Leanza H. 2011. El basamento ígneo y metamórfico. En: Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, C., Danieli, J. C. y Vallés, J. M. (Eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. 18° Congreso Geológico Argentino, Relatorio* 37-47, Neuquén.
- Cristallini, E., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, JM, Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O. 2009. Controles precuyanos en la estructura de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* , 65(2), pp: 248-264.
- Cucchi, R. J., Espejo, P. M. y González, R. 1998. Hoja Geológica 4169-I Piedra del Águila.
- Danieli, J. C., Coppolecchia, M., y Elissondo, M. 2011. El Grupo Andacollo (Paleozoico Tardío). *Relatorio Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén (Leanza, HA; Arregui, C,* 49-62.
- De Ferrariis, C., 1947. Edad del arco o dorsal antigua del Neuquén oriental de acuerdo con la estratigrafía de la zona inmediata. *Sociedad Geológica Argentina, Revista* 2 (3): 256 -283.

- Dellapé, D. A., Mombrú, C., Pando, G., 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 consideraciones sobre la distribución y significado de las sedimentitas Lotenianas. *Obra Centenario Museo La Plata 5*: 81-105, La Plata.
- D'Elia, L., Bilmes, A., Franzese, J. R., Veiga, G. D., Hernández, M., y Muravchik, M. 2015. Early evolution of the southern margin of the Neuquén Basin, Argentina: tectono-stratigraphic implications for rift evolution and exploration of hydrocarbon plays. *Journal of South American Earth Sciences*, 64, 42-57.
- Digregorio, J. H., 1972. Neuquén. En: *Geología Regional Argentina*. A. F. Leanza Director y Editor. Centenario Academia Nacional de Ciencias, pp. 439-506. Córdoba.
- Folguera, A., Ramos, V. A. y Melnick, D. 2002. "Partición de la deformación en la zona del arco volcánico de los Andes neuquinos en los últimos 30 millones de años (36°-39°S)". *Revista Geológica de Chile* 29: pp. 151-165.
- Franzese, J.R. y Spalletti, L.A. 2001. Late Triassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation and pre-break-up rifting. *Journal of South American Earth Sciences* 14: 257-270.
- Franzese, J., Spalletti, L., Gómez Pérez, I. y Macdonald, D. 2003. Tectonic and paleoenvironmental evolution of Mesozoic sedimentary basins along the Andes foothills of Argentina (32°-54°S). *Journal of South American Earth Sciences*. 16: 81-90.
- Franzese, J.R, Veiga, G.D, Schwarz, E. y Gómez-Pérez, I. 2006. Evolución tectonoestratigráfica de un sistema fronterizo de graben mesozoico: el depocentro de Chachil, sur de la Cuenca Neuquina, Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica* , 163 (4), 707-721.
- Garrido, A.C. 2011. El Grupo Neuquén (Cretácico tardío) en la Cuenca Neuquina. *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, pág. 231-244. Neuquén.
- Gerth, E., 1925. Contribuciones a la estratigrafía y paleontología de los Andes Argentinos. I. Estratigrafía y distribución de los sedimentos mesozoicos en los Andes Argentinos. *Academia Nacional de Ciencias, Actas* 9 (1-2): 7 - 55. Córdoba.
- Giacosa, R., Allard, J., Foix, N. y Heredia, N. 2014. Stratigraphy, structure and geodynamic evolution of the Paleozoic rocks in the Cordillera del Viento (37° S latitude, Andes of Neuquén, Argentina). *Servicio Publicaciones, Journal of Iberian Geology*, 40(2), 331-348.
- Giambiagi, L., Tunik, M., Barredo, S., Bechis, F., Ghiglione, M., Alvarez, P., y Drosina, M. 2009. Cinemática de apertura del sector norte de la cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(2), 278-292.
- Gianni, G. M., F. M. Dávila, A. Echaurren, L. Fennell, J. Tobal, C. Navarrete, P. Quezada, A. Folguera y M. Giménez , 2018. A geodynamic model linking Cretaceous orogeny, arc migration foreland dynamic subsidence and marine ingression in southern South America. *Earth-Science Reviews* 185:437-462

- Gregori, D. A., Rossi, A. C., y Benedini, L. 2011. Geocronología de la Faja Batolítica Aluminé, Provincia de Neuquén, Argentina. En: Resumen del XVIII Congreso Geológico Argentino (pp. 93-94).
- Groeber, P., 1918. Edad y extensión de las estructuras de la Cordillera entre San Juan y Nahuel Huapí. *Physis* 4 (17): 208-240.
- Groeber, P., 1929. Líneas fundamentales de la geología del Neuquén, sur de Mendoza y regiones adyacentes. Dirección General de Minería, Geología e Hidrología, Publicación 58: 1-109.
- Groeber, P., 1946. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70°. 1. Hoja Chos Malal. *Revista de la Sociedad Geológica Argentina*, 1 : 177-208.
- Gulisano, C.A., Gutiérrez Pleimling, A.R. y Digregorio, R.E. 1984. "Esquema estratigráfico de la Secuencia Jurásica del Oeste de la provincia del Neuquén". 9º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: pp.236-259, San Carlos de Bariloche.
- Harding, T. 1983. Structural inversion at Rambutan oil field, South Sumatra Basin. En Bally, W. (ed.). *Seismic expression of structural styles: a picture and work atlas*. American Association of Petroleum Geologists, *Studies in Geology* 15 (3): 3-18.
- Herrero Ducloux, A., 1946. Contribución al conocimiento geológico del Neuquén Extraandino. *Boletín de Informaciones Petroleras*, 266: 245-280.
- Hervé F., Fanning, C. M., Calderón, M. y Mpodozis, C. 2013. Early Permian to Late Triassic batholiths of the Chilean Frontal Cordillera (28° - 31°S): SHRIMP U-Pb zircon ages and Lu-Hf and O isotope systematics. *Lithos* 184 – 187, p. 436 – 446.
- Howell, J. A., Schwarz, E., Spalletti, L. A. y Veiga, G. D. 2005. The Neuquén Basin: an overview. En: Veiga, G. D., Spalletti, L. A., Howell, J. A. y Schwarz, E. (eds.). *The Neuquén Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*. Geological Society, London, Special Publications. 252: pp.83-107.
- Jorgensen, L., G. A. Lopez Pezé, G. A. y Pisani, F. 2013. Caracterización de la Fm Los Molles como reservorio de tipo Shale Gas en el ámbito Norte de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina, Argentina, mostrando su analogía con reservorio de Shale Gas probado en EEUU. Society of Petroleum Engineers. Buenos Aires, Argentina.
- Kallweit, R.S y Wood, L.C. 1982. Los límites de resolución de ondas de fase cero. *Geofísica*, 47 (7), 1035-1046.
- Kay, S. M, Ramos, V. A., Mpodozis, C. y Sruoga, P. 1989. "Late Paleozoic to Jurassic silicic magmatism at the Gondwana margin: Analogy to the middle Proterozoic in North America?" *Geology* 17: pp. 324-328.
- Lambert, L. R., 1946. Contribución al conocimiento de la sierra de Chacay-Có (Neuquén). *Sociedad Geológica Argentina, Revista* 1 (4): 231-252.
- Lambert, L. R., 1948. Geología de la zona de las cabeceras del río Catán Lil, Territorio del Neuquén. *Asociación Geológica Argentina, Revista* 3 (4): 245-257.

- Larriestra, F., Erra, G., y Ottone, E. G. 2018. Palinología y geoquímica de la Formación Los Molles, Grupo Cuyo, Jurásico, provincia del Neuquén.
- Leanza, H. A., 2003. Las sedimentitas huirinianas y rayosianas (Cretácico inferior) en el ámbito central y meridional de la cuenca Neuquina, Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas - Geología 2 : 1-31. Buenos Aires.
- Leanza, H. A. 2009. Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 11(2), 145-184.
- Leanza, H.A. y Hugo, C.A. 1997. Hoja Geológica 3969 – III Picún Leufú. Provincias del Neuquén y Río Negro. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 218, 135 pp. Buenos Aires.
- Leanza, H. A., Hugo, C. A., Repol, D., González, R., Danieli, J. C. y Lizuain, A. 2001. Hoja Geológica 3969-I Zapala.
- Leanza, H. A., F. Sattler, R.S. Martinez, y O. Carbone. 2011. “La Formación Vaca Muerta y equivalentes (Jurásico Tardío – Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina, En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. C., y Vallés, J. M. (Eds.). Geología y recursos naturales de la provincia del Neuquén: Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino, pp. 113-130.
- Legarreta, L., y Gulisano C. 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico Superior - Terciario Superior), Argentina, en G. A Chebli y L. A. Spalletti (eds): Cuencas Sedimentarias Argentinas, Serie de Correlación Geológica N° 6 Tucumán. 221-243 p.
- Legarreta, L. Villar, H. J., Cruz, C. E., Laffitte G. A. y Veradé, R. 2008. “Revisión integrada de los sistemas generadores, estilos de migración-entrapamiento y volumetría de hidrocarburos en los distritos productivos de la Cuenca Neuquina, Argentina”. En: Cruz, C. E., Rodríguez, J. F., Hechem, J. J. y Villar, H. J. (eds.) *Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas*. pp: 79-108.
- Llambías, E.J., Leanza, H.A. y Carbone, O. 2007. Evolución tectonomagmática durante el Pérmico al Jurásico Temprano en la Cordillera del Viento (37° 05’S - 37° 15’S): Nuevas evidencias geológicas y geoquímicas del inicio de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 62 (2): 217- 235. Buenos Aires
- Llambías, E.J. y Sato, A.M. 2011. El ciclo Gondwánico: la provincia magmática Choiyoi en Neuquén: Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino.
- Macdonald, D., Gómez Perez, I., Franzese, J., Spalletti, L., Lawver, L., Gahagan, L., Dalziel, I., Thomas, C., Trewin, N., Hole, M. & Paton, D. 2003. Mesozoic break-up of SW Gondwana: implications for regional hydrocarbon potential of the southern South Atlantic. *Marine and Petroleum Geology* 20: 287–308.
- Maretto, H., Royo, J., Verzi, H., Verdur, H. & Larriestra, C. 2005. Caracterización de reservorios, Formación Sierras Blancas. Yacimiento Loma La Lata: desde la corona a la sísmica. 6° Congreso Argentino de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas en CD. Mar del Plata.
- Mendiberri, H y Carbone, O. 2002. Cuenca Neuquina: Marco Geológico y reseña histórica de la actividad petrolera. En rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. Schiuma, Hinterwimmer y Vergani Ed. V Congreso de exploración y desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata. 201-228 p.

- Mosquera, A. 2002. Inversión tectónica Jurásico inferior en el sector central de la Dorsal de Huincul, Área Los Bastos. 5° Congreso Argentino de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas en CD. Mar del Plata.
- Mosquera, A. 2008. “Mecánica de deformación de la cuenca Neuquina (Triásico-Terciario)”. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 270p., Buenos Aires.
- Mosquera, A., Ramos, V. A. y Kay, S. M. 2006. Interplate deformation in the Neuquen Embayment. *Special Papers-Geological Society of America*, 407:97 pp.
- Mosquera, A., Silvestro, J., Ramos, V. A., Alarcón, M., y Zubiri, M. 2011. La estructura de la Dorsal de Huincul. En: *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. Geología y Recursos Naturales del Neuquén* (pp. 385-398).
- Muñoz, M., F. Tapia, M. Persico, M. Benoit, R. Charrier, M. Farías y A. Rojas, 2018. Extensional tectonics during Late Cretaceous evolution of the Southern Central Andes: Evidence from the Chilean main range at ~35° S. *Tectonophysics* 744:93-117.
- Musso, T., Concheyro, A. y Pettinari, G. 2012. Mineralogía de arcillas y nanofósiles calcáreos de las formaciones Jagüel y Roca en el sector oriental del lago Pellegrini, Cuenca Neuquina, República Argentina. *Geología andina*, 39 (3), 511-540.
- Nullo, F. 1979. Descripción geológica de la hoja 39 c, Paso Flores, provincia de Río Negro. Servicio Geológico Nacional, Boletín 167.
- Olmos, M.; Maretto, H.; Lasalle, D.; Carbone, O. y Naidés, C. 2002. Los reservorios de la formación Quintuco. En: Schiuma M.; Hinterwimmer G. y Vergani G. (Eds.): *Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina*, V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata (pp. 359-382).
- Orchuela, J., Ploszkiewicz, V. y Viñes, R. 1981. Reinterpretación estructural de la denominada Dorsal Neuquina. 8° Congreso Geológico Argentino (San Luis), Actas 3: 281-293.
- Otharán, G. 2020. Sedimentología y análisis de facies de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano-Valanginiano) Cuenca Neuquina: el rol de los flujos de fango en la depositación de espesas sucesiones de lutitas. Tesis doctoral. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- Pángaro, F., Melli, A. T., Malone, P., Cevallos, M., Soraci, A., Mosquera, A., y Kim, H. J. 2005. “Modelos de entrapamientos de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina, Argentina”. En E. Kozłowski, G. Vergani y A. Boll, *Las trampas de hidrocarburos en las Cuencas Productivas Argentinas*. VI° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. pp. 331-368.
- Pángaro, F., Pereira, M. y Micucci, E. 2009. “El sinrift del ámbito de la dorsal de Huincul, cuenca Neuquina: su evolución y control sobre el registro estratigráfico del Jurásico y la evolución estructural del área”. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 265-277.
- Petrolera Pampa. 2014. Informe final del pozo: Pamp.Nq.PVO.x-2001 (Aguada Pavón). Petrolera Pampa (inédito). 4 pp. Neuquén.
- Pino, D. A., Zalazar, M., Gómez, R. A., Díaz Martínez, I., Tunik, M. A., y Coria, R. A. 2022. Estudio paleoambiental de la formación Mulichinco (Valanginiano Temprano), Cuenca Neuquina, en la zona de Río Salado (Neuquén, Argentina).

- Pioneer Natural Resources. 2002. Informe final del Pozo Pi.Nq.NQ. a-1020 (Divisadero General San Martín). Pioneer Natural Resources (inédito). 4 pp. Buenos Aires.
- Pioneer Natural Resources. 2002. Informe final del Pozo Pi.Nq.NQ-1034 (Divisadero General San Martín). Pioneer Natural Resources (inédito). 9 pp. Buenos Aires.
- Pioneer Natural Resources. 2004. Informe final de procesamiento del volumen sísmico 3D Ojo de Agua. Pioneer Natural Resources (inédito). 27 pp. Buenos Aires.
- Pioneer Natural Resources. 2006. Informe final del Pozo Pi.Nq.OdA.x-1 (Bloque Ojo de Agua). Pioneer Natural Resources (inédito). 11 pp. Buenos Aires.
- Ploszkiewicz, V., Orchuela, L., Vaillard, J., y Viñes, R. 1984. Compresión y desplazamiento lateral en la zona de falla Huincul, estructuras asociadas, Provincia de Neuquén. 9º Congreso Geológico Argentino (Bariloche), Actas 2: 163-169, Buenos Aires.
- Ramos, V. 1978. Estructura. Relatorio Geología y Recursos Naturales del Neuquén, 7º Congreso Geológico Argentino (Neuquén), Relatorio: 99-118, Buenos Aires.
- Ramos, V.A., Zapata T., Cristallini, E. y Introcaso, A. 2004. The Andean thrust system: latitudinal variations in structural styles and orogenic shortening. En: McClay, K. (Ed.): Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 82(3): 30-50.
- Ramos, V. A. y Folguera, A. 2005. "Tectonic Evolution of the Andes of Neuquén: Constraints Derived from the Magmatic Arc and Foreland Deformation" In: Veiga, G. et al. (Eds.): The Neuquén Basin: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics. The Geological Society, Special Publication 252: 15-35.
- Ramos, V. A., Folguera, A., y García Morabito, E. 2011. Las provincias geológicas del Neuquén. En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. C., y Vallés, J. M. (Eds.). Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. Relatorio 18º Congreso Geológico Argentino, Neuquén (pp. 317-326).
- Reijenstein, H. M., Posamentier, H. W., Fantin, M., González Tomassini, F., y Lipinski, C. 2014. Vaca Muerta Seismic stratigraphy and Geomorphology: regional architectural trends for unconventional exploration. In IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos IAPG, Mendoza, Argentina.
- Riccardi, A.C. y Gulisano, C. 1993. Unidades limitadas por discontinuidades: su aplicación al Jurásico Andino. Revista de la Asociación Geológica Argentina 45(3-4): 346-364, Buenos Aires.
- Rolleri, E.O. y Criado Roqué, P., 1970. Geología de la provincia de Mendoza. Cuartas Jornadas Geológicas Argentinas, 2: 1-60.
- Sagasti, G. 2002. Estudio sedimentológico y de estratigrafía secuencial de las sedimentitas carbonáticas de la Formación Agrio (Cretácico inferior), en el sector surmendocino de la cuenca Neuquina, República Argentina. Tesis Doctoral (inédita), Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata.
- Sato, A. M., Llambías, E. J., Basei, M. A. S. y Leanza, H. A. 2008. The Permian Choiyoi Cycle in cordillera del Viento (Principal Cordillera, Argentina): over 25 Ma of magmatic activity. VI South American Symposium on Isotope Geology, (April 2016), 3-6.

Sheriff, R. 1985. Aspects of seismic resolution. En Seismic stratigraphy II. American Association of Petroleum Geologists. 1 – 10 p.

Sigismondi, M.E. 2013. Estudio de la deformación litosférica de la cuenca Neuquina: estructura termal, datos de gravedad y sísmica de reflexión. (Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.)

Sigismondi, M. E., Ramos, V. A., Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J. C., y Vallés, J. M. 2011. El basamento de la Cuenca Neuquina. En: Geología y recursos naturales de la provincia. Congreso Geológico Argentino, Neuquén.

Silvestro, J. y Zubiri, M. 2008. “Convergencia oblicua: modelo estructural alternativo para la dorsal Neuquina (39°S)”. Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63: 49-64.

Spalletti, L., Franzese, J., Matheos, S. y Schwarz, E. 2000. Sequence stratigraphy of a tidally-dominated carbonate-siliciclastic ramp; the Tithonian of the southern Neuquén Basin, Argentina. Journal of the Geological Society. 157: 433-446.

Spalletti, L. A., Arregui, C. D., Veiga, G. D., Leanza, H. A., Carbone, O., Danielli, J. C., y Vallés, J. M. 2011. La Formación Tordillo y equivalentes (Jurásico Tardío) en la Cuenca Neuquina. En Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, 18 Congreso Geológico Argentino, Argentina: Asociación Geológica Argentina (pp. 99-111).

Suárez, M., Fanning, M., Etchart, H. y De La Cruz, R. 2008. Carboniferous, Permian and Toarcian magmatism in Cordillera del Viento, Neuquén, Argentina: U-Pb SHRIMP dates and tectonic implications. XVII Congreso Geológico Argentino, Jujuy.

Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén. 2022. <http://hidrocarburos.energianequen.gob.ar/>

Stipanovic, P.N., Rodrigo, F., Baulies, O.L. y Martínez, C.G., 1966. Las formaciones presenonianas del denominado Macizo Nordpatagónico y regiones adyacentes. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 23(2): 367-388. Buenos Aires.

Stipanovic, P.N., Rodrigo, F., Baulies, O.L. y Martínez, C.G., 1968. Las formaciones presenonianas del denominado Macizo Nordpatagónico y regiones adyacentes. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 23(2): 367-388. Buenos Aires.

Schwarz, E., Spalletti, L.A. y Howell, J.A. 2006. Sedimentary response to a tectonically-induced sea-level fall in a shallow back-arc basin: the Mulichinco Formation (Lower Cretaceous), Neuquén Basin, Argentina. Sedimentology, 53: 55-81

Schwarz, E., Spalletti, L. A., Veiga, G. D., Leanza, H., y Arregui, C. 2011. La Formación Mulichinco (Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J. y Vallés, J. (Eds.) Geología y 100 Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino: 131-144, Neuquén.

Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. y Ramos, VA. 2010. Levantamiento temprano y deformación orogénica en la Cuenca Neuquina: limitaciones en el levantamiento andino a partir de datos isotópicos de U-Pb y Hf de circones detríticos. *Tectonofísica*, 489 (1-4), 258-273.

Turic, M., Aramayo Flores, E., Gómez Omil, R., Pombo, R., Peroni, G., Sciutto J., Robles, D. y Cáceres, A. 1987. "Geología de las cuencas petroleras de la Argentina.". En Felder, B. A. (ed.) Evaluación de las Formaciones en la Argentina 1 (1): 1-44, Schlumberger, Buenos Aires.

Uliana, M.A. y Dellapé, D.A., 1981. Estratigrafía y evolución paleoambiental de la sucesión eoterciaria del Engolfamiento Neuquino (Patagonia septentrional). 8° Congreso Geológico Argentino, 3 : 673-711. Buenos Aires.

Uliana, M., Arteaga, M., Legarreta, L., Cerdan, J. y Peroni, G. 1995. Inversion structures and hydrocarbon occurrence in Argentina. En: Buchanan, J. y Buchanan, P. (Eds.): Basin inversion. The Geological Society, Special Publication 88: 211-233. London.

Varela, R., Basei, M.A.S., Cingolani, C.A., Siga Jr., O. y Passarelli, C.R. 2005. El basamento cristalino de los Andes norpatagónicos en Argentina: geocronología e interpretación tectónica. Revista Geológica de Chile 32(2):167-187.

Veiga, G. D., Spalletti, L. A., y Schwarz, E. 2011. El Miembro Avilé de la Formación Agrio (Cretácico Temprano). En: Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J. y Vallés, J. (Eds.) Geología y 100 Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino: 2-6, Neuquén.

Vergani, G., Tankard, J., Belotti, J., Welsink, J. 1995. "Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina". En Tankard, A. J., Suárez, R. y Welsink, H. J. (eds.) Petroleum Basins of South America, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62: 383-402.

Villar, H. J., Legarreta, L., Cruz, C. E., Laffitte, G. A. y Vergani, G., 2005. "Los cinco sistemas petroleros coexistentes en el sector sudeste de la Cuenca Neuquina: definición geoquímica y comparación a lo largo de una transecta de 150 km". VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Actas CD-ROM, 17p., Mar del Plata. Republicado en Boletín de Informaciones Petroleras BIP, Cuarta Época Año 2 N°3, p. 50-67.

Volkheimer, W., 1964. Estratigrafía de la zona extraandina del departamento de Cushamen (Chubut) entre los paralelos 42° y 42°30' y los meridianos 70° y 71 °. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 19 (2): 85-107.

Weaver, Ch., 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west central Argentina. Memoir University Washington, 1:1-469. Seattle.

Yacimientos petrolíferos fiscales. 1958. Informe final del pozo YPF.Nq.NX-39.YPF (inédito). 45 pp. Neuquén.

Yacimientos petrolíferos fiscales (a). 1959. Informe final del pozo YPF.Nq.ALN-1.YPF (inédito). 37 pp. Neuquén.

Yacimientos petrolíferos fiscales (b). 1959. Informe final del pozo YPF.Nq.LFa.x-1.YPF (inédito). 28 pp. Neuquén.

Yacimientos petrolíferos fiscales (c). 1959. Informe final del pozo YPF.Nq.Me.x-2. YPF (inédito). 70 pp. Neuquén.

Yacimientos petrolíferos fiscales. 1977. Informe final del pozo YPF.Nq.PV.x-4.YPF (inédito). 45 pp. Neuquén.

Zamora Balcarce, G., Zapata, T., del Pino, D. y Ansa, A. 2006. Structural evolution and magmatic characteristics of the Agrio fold-and thrust belt. En: Kay, S.M. y Ramos, V.A. (Eds.): Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39° S lat), Geological Society of America, Special Paper 407: 125- 145.

Zanettini, J., Leanza, H., Giusiano, A. y Santamaría, G. 2010. Hoja Geológica 3972-II, Loncopué, provincia del Neuquén. IGRM-SEGEMAR, Boletín 381, 93p. Buenos Aires.

Zavala C. y Ponce J. 2011. La Formación Rayoso (Cretácico temprano) en la Cuenca Neuquina. En Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J. y Vallés, J. (Eds.) Geología y 100 Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino: 205-222, Neuquén

Zavala, C., Arcuri, M., Di Meglio, M., Zorzano, A. y Otharán, G. 2020. Levantamiento Jurásico a lo largo del arco de Huincul y sus consecuencias en la estratigrafía de los grupos Cuyo y Lotena. Cuenca Neuquina, Argentina. Apertura y cierre de la Cuenca Neuquina en los Andes meridionales , 53-74.

Zumel, J., García, R., y Pando, G. 2002. Los reservorios del Grupo Cuyo inferior. En: Rocas reservorio de las cuencas productivas argentinas. V° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata (pp. 255-275).

11. ANEXOS

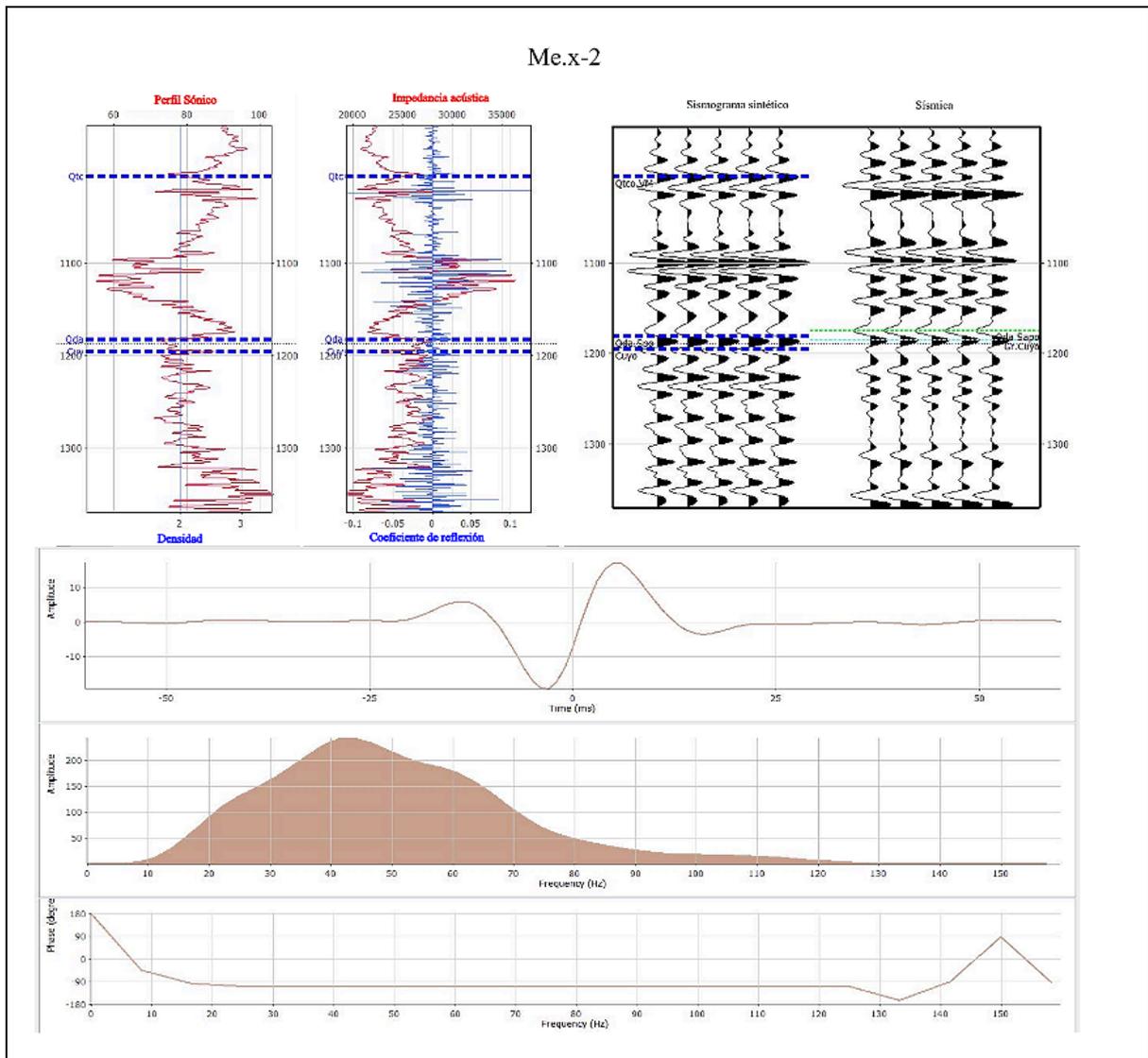


Figura 80. Fase, frecuencia y amplitud de la ondícula del pozo Me.x-2 luego de su correlación.

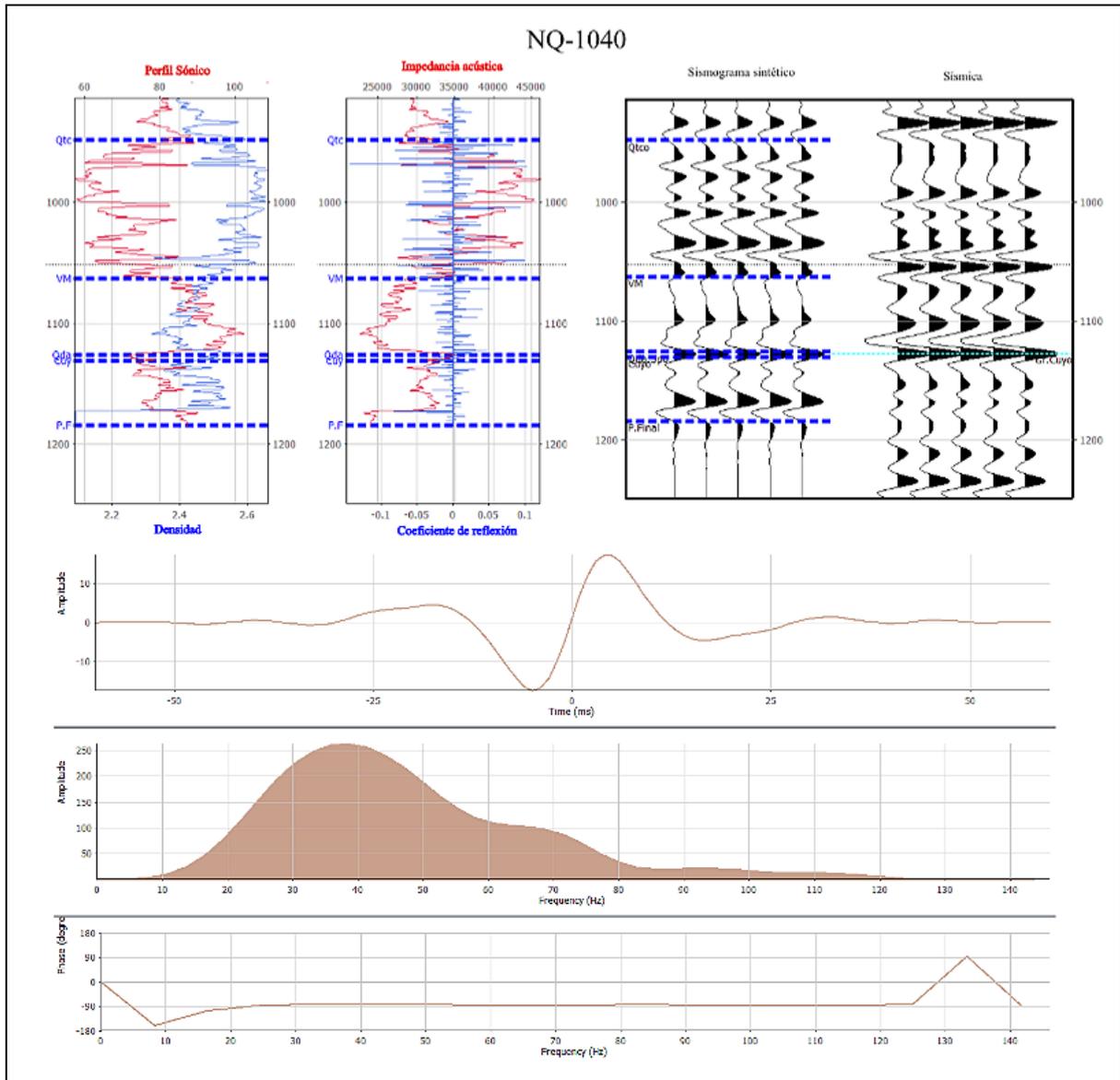


Figura 81. Fase, frecuencia y amplitud de la ondícula del pozo NQ-1040 luego de su correlación.

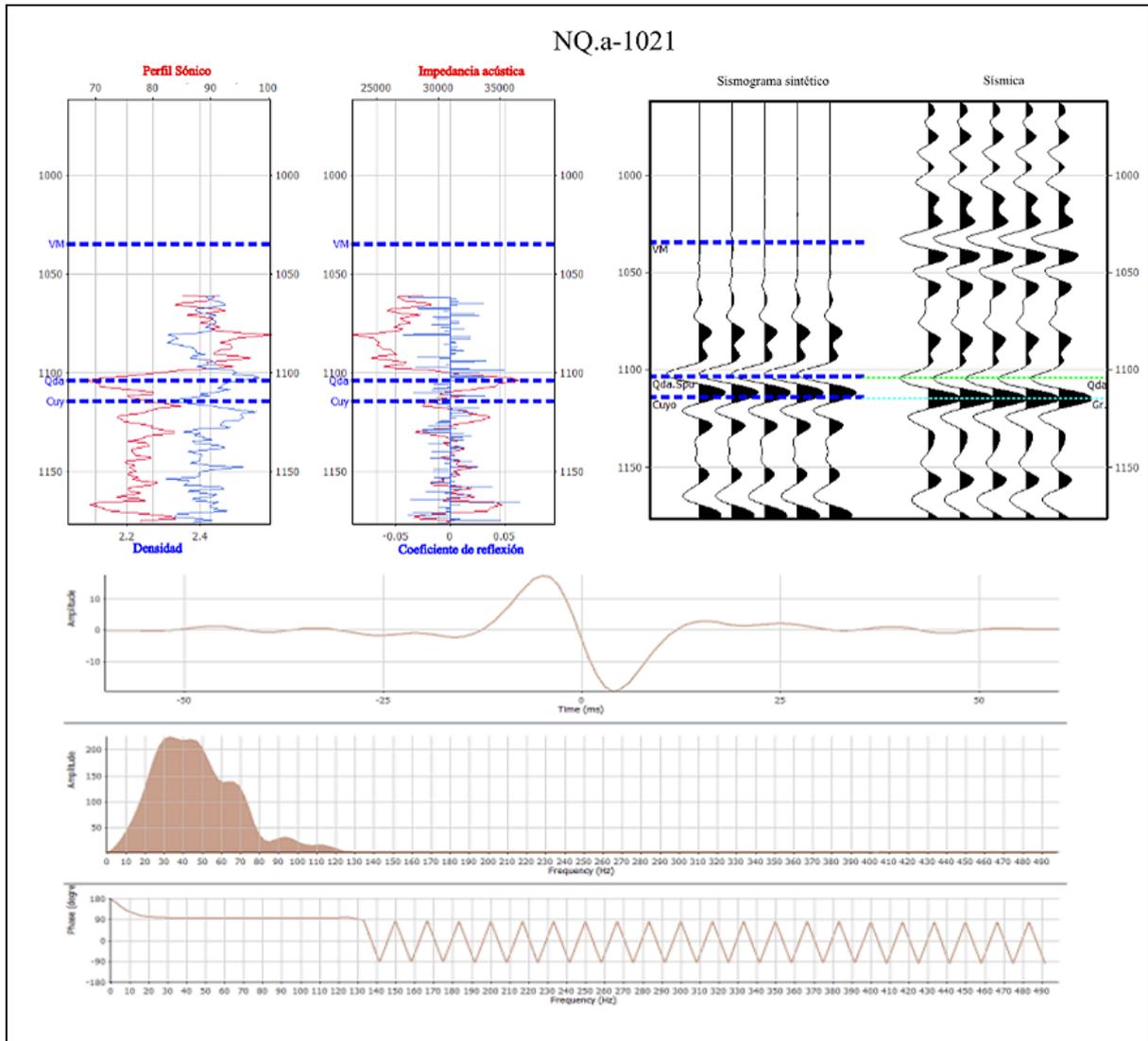


Figura 82. Fase, frecuencia y amplitud de la ondícula del pozo NQ.a-1021 luego de su correlación.

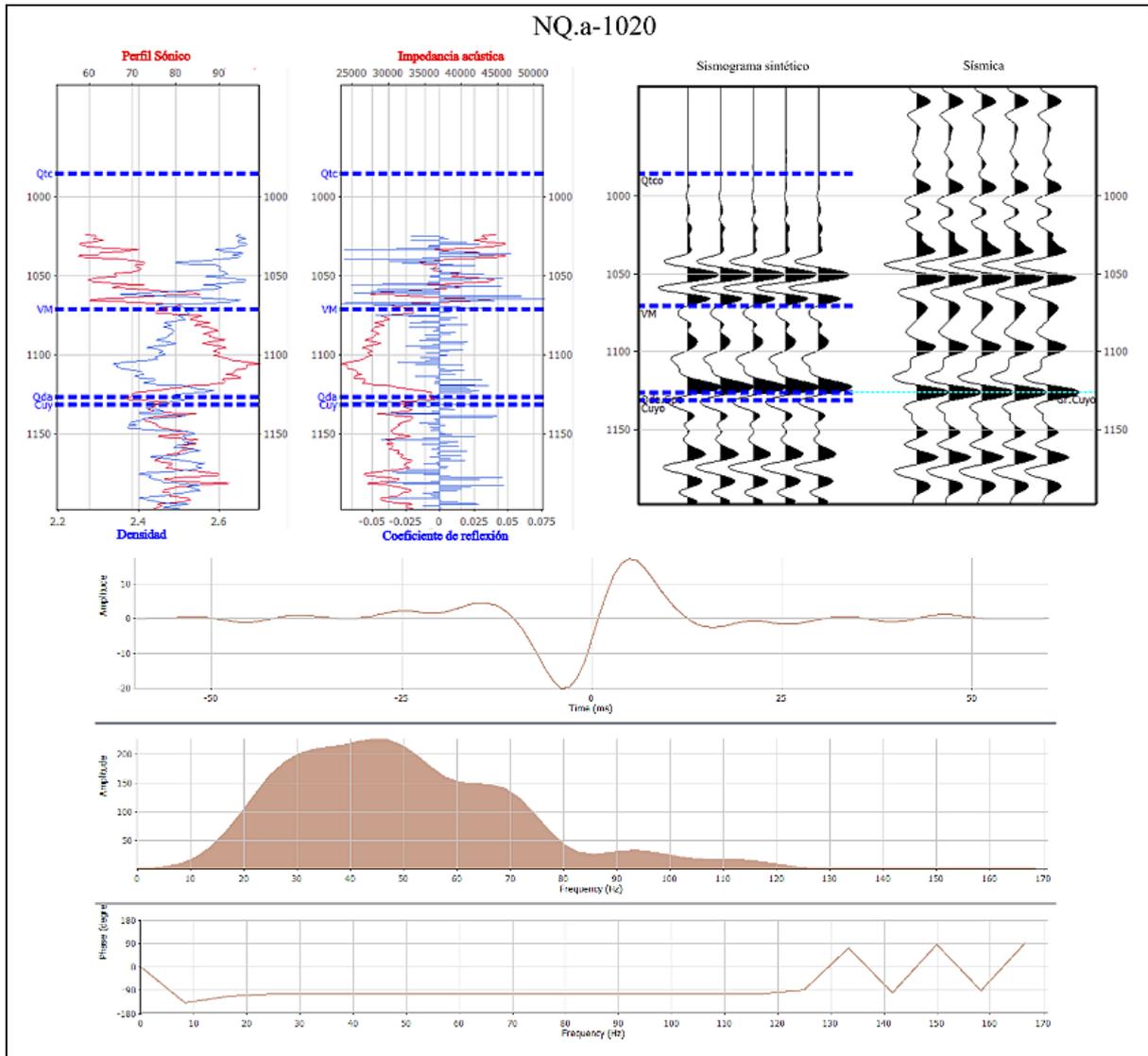


Figura 83. Fase, frecuencia y amplitud de la ondícula del pozo NQ.a-1020 luego de su correlación.

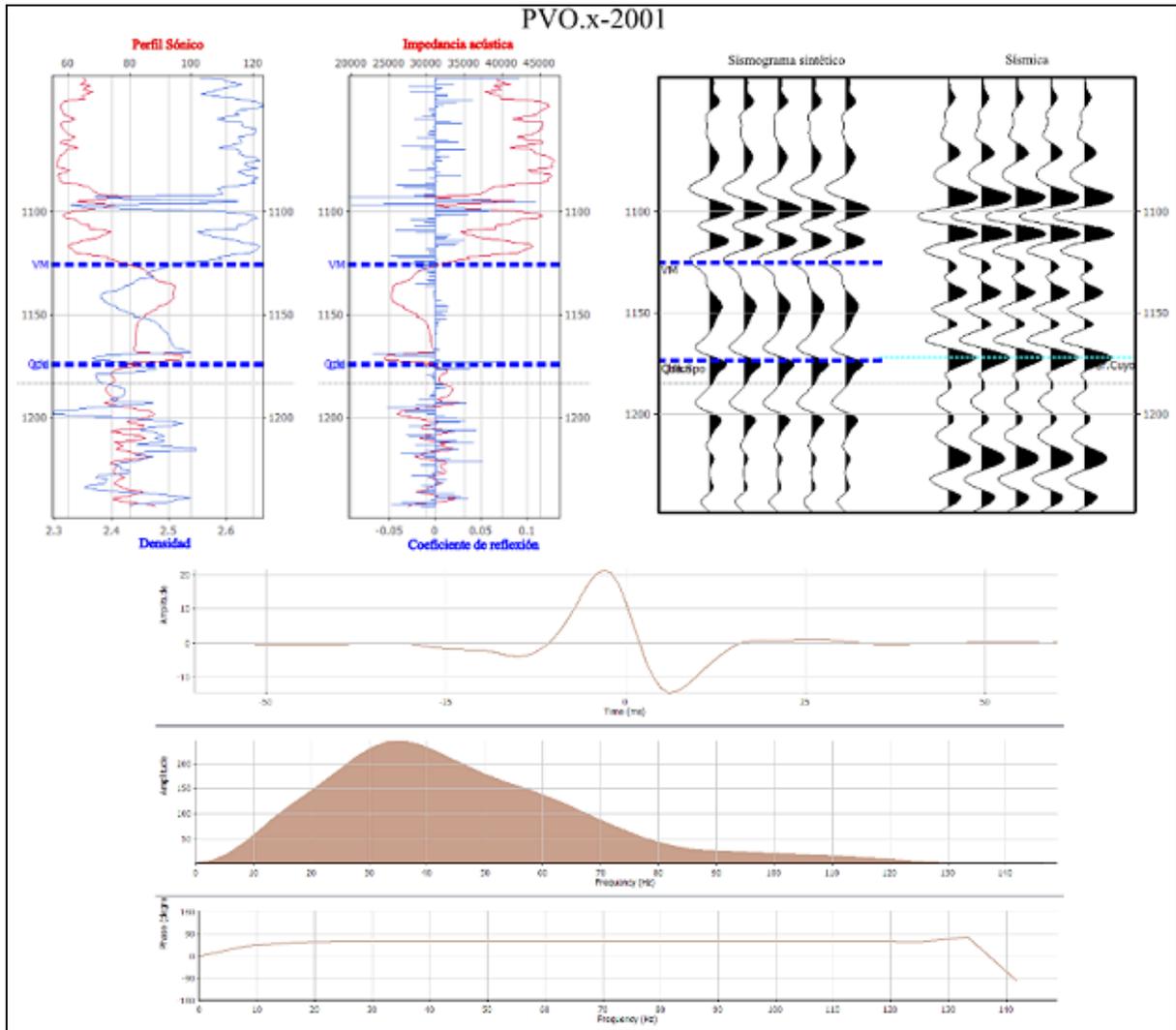


Figura 84. Fase, frecuencia y amplitud de la ondícula del pozo PVO.x-2001 luego de su correlación.