



**IDENTIFICACIÓN
Y ANÁLISIS DE
NIVELES
ACUÍFEROS
MEDIANTE DATOS
SÍSMICOS Y DE
POZOS, EN EL ÁREA
AGUA DEL CAJÓN,
CUENCA NEUQUINA**

Trabajo Final de Licenciatura

Alumna: Kathya Pretz

Directora: Lic. Sheyla E. Iglesias

Codirectora: Dra. Ana C. Dufilho

Universidad Nacional del
Comahue

Facultad de Ingeniería

Lic. en Ciencias Geológicas

Año 2021

RESUMEN

El conocimiento de la presencia y características del agua subterránea en una región es de suma importancia no solo para el uso de la misma, sino también para la protección y el buen manejo del recurso natural. En la Provincia del Neuquén se exige en los pozos hidrocarburíferos la protección de aquellos niveles con agua de salinidades menores a 3000 ppm de sales totales. Este trabajo está enfocado a la identificación y mapeo de niveles acuíferos identificados hasta los 1000 m de profundidad dentro del área de concesión Agua del Cajón, en el sector este de la Cuenca Neuquina. Para su determinación y mapeo se utilizaron tanto registros de pozo como datos de sísmica 3D. A partir de los perfiles de control geológico y registros eléctricos de pozo se determinaron aptitudes hidrogeológicas como litología, porosidad y salinidad; parámetros necesarios para la delimitación de zonas acuíferas. Con el uso de la sísmica 3D se extrapolaron los datos a toda el área.

Se determinó que los niveles con presencia de agua de baja salinidad (<3000 ppm) se encuentran principalmente dentro de rocas pertenecientes al Gr. Neuquén y en niveles superiores de la Fm. Rayoso/Centenario. Entre ambas zonas existe una potente secuencia de rocas que actuaría como acuitardo regional, asociada a la Fm. Candeleros.

Palabras clave: Agua subterránea, Cuenca Neuquina, Agua del Cajón, Grupo Neuquén.

ABSTRACT

The knowledge of the presence and characteristics of groundwater in a region is of crucial importance not only for the use of groundwater, but also for the protection and the correct management of the natural resource. The law of the Neuquén Province requires the protection of low salinity water levels (<3000 ppm) in hydrocarbon wells. This work is focused on the identification and mapping of aquifer levels, up to nearly 1000 meters deep, within the Agua del Cajón oil field, located at the east of the Neuquén Basin. Borehole information and 3D seismic data have been used for its determination. Hydrogeological properties such as lithology, porosity and salinity, parameters necessary for the delimitation of aquifer areas, were determined from cutting records and electric logs. With the use of 3D seismic, the data was extrapolated to the entire area.

It was determined that water levels with low salinities are mainly found within the Neuquén Group, and in the upper levels of the Rayoso/Centenario Formation. Between both zones there is a thick sequence of rocks that may act as a regional aquitard, associated with the Candeleros Formation.

Key words: Groundwater, Neuquén Basin, Agua del Cajón, Neuquén Group.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Comahue, hogar e institución en la cual me formé durante estos años.

Al Estado Nacional, por sustentar la educación pública de calidad. No olvidemos nunca el gran privilegio que tenemos los argentinos.

A la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén, la cual brindó los datos de sísmica y de pozos para la realización de este trabajo.

A la empresa Halliburton, quien brindó el software Decision Space.

A todos los grandes profesionales que forman parte de la carrera de Geología, a quienes respeto y admiro profundamente. Gracias no sólo por todos sus conocimientos brindados, sino también por contagiarnos el amor por este camino que escogimos.

A mis directoras Sheyla Iglesias y Cecilia Dufilho, mis guías en este trabajo. Gracias por brindarme sus conocimientos, tiempo y dedicación.

A Sheyla Iglesias, mención aparte; gracias no sólo por la oportunidad de tomarme como tesista allá lejos y hace tiempo cuando ni siquiera teníamos un tema, sino también por la oportunidad de realizar mis prácticas con la cátedra de Interpretación Sísmica. Gracias por la infinita paciencia y dedicación.

Al jurado evaluador por su buena predisposición y aceptar mi trabajo final, Dr. Luis Mas, Lic. Magalí Alonso y Lic. Rocío Roth. Gracias por tomarse el tiempo de leerlo y por las correcciones que aportaron a que este trabajo salga lo mejor posible.

A Marina Garrone, por salvarme las papas cada vez que necesitaba ayuda con el programa. Gracias por el tiempo, la paciencia y la buena predisposición.

A todos los geocompañeros con los que tuve la oportunidad de compartir aula y campo. Sin dudas el camino no hubiera sido el mismo sin ustedes. Me llevo un pedacito de cada uno en la mochila.

A mis papás, por su apoyo incondicional todos estos años. Gracias por permitirme estudiar plenamente. Gracias por cada palabra de motivación y consuelo. Les estaré agradecidos toda la vida.

A mi novio y futuro colega, gracias por ser todo y más.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Área de estudio.....	1
2. Marco geológico.....	3
2.1 Cuenca Neuquina.....	4
2.2 Unidades estratigráficas de interés hidrológico.....	9
3. Marco teórico – metodológico.....	13
3.1 Hidrogeología.....	13
3.2 Propiedades físicas de las rocas.....	15
3.3 Perfiles o registros de pozos.....	17
3.4 Sísmica de reflexión.....	24
3.5 Programa para el análisis de datos.....	31
4. Desarrollo / Aplicación.....	32
4.1 Información de subsuelo utilizada.....	32
4.2 Análisis de datos de pozos.....	36
Características litológicas a partir de datos de control geológico.....	36
Correlación de pozos a partir de un perfil eléctrico tipo del área de estudio.....	39
Propiedades hidrogeológicas obtenidas a partir de registros eléctricos.....	42
Niveles de interés hidrogeológico (Criterios límite propiedades – condicionales).....	43
4.3 Análisis de datos sísmicos.....	44
Correlación pozos-sísmica (atado de pozo).....	44
Determinación de resolución sísmica.....	46
Interpretación de horizontes sísmicos y fallas en el entorno de interés.....	47
Mapas isócronos.....	49
4.4 Integración datos de pozos-sísmica.....	51
Modelo de velocidad somero y conversión de horizontes sísmicos profundidad.....	51
5. Resultados y discusiones.....	52
6. Conclusiones y recomendaciones.....	61
6.1 Futuras líneas de investigación.....	62
7. Bibliografía.....	63
ANEXOS.....	67

1. Introducción

El agua es sin dudas el líquido más ampliamente distribuido en la corteza terrestre y es un recurso natural indispensable para la vida. El agua subterránea representa el mayor porcentaje de reserva de agua dulce en el planeta, después de los glaciares. Al ser un elemento oculto del ciclo del agua, suele tener limitada atención y conocimiento general. Esta falta de visibilidad sin embargo, no se condice con el uso que se hace de la misma. Hoy en día la población mundial extrae 200 veces más agua que petróleo, en términos de volumen por año, del subsuelo. El agua subterránea es mundialmente usada en muchos países: es usualmente la fuente primaria de agua potable (cerca del 50%) y contribuye significativamente al riego y por lo tanto, a la seguridad alimentaria en las regiones áridas y semiáridas; sostiene humedales y ríos, proporciona estabilidad al suelo y evita la intrusión de agua de mar. En los últimos tiempos el agua subterránea ha sido puesta bajo un estrés excepcional en numerosas regiones, debido a los efectos que el crecimiento de la población, el cambio climático y las actividades humanas generan sobre ella, causando agotamiento y contaminación (Margat y van der Gun, 2013).

Sin ir más lejos, el creciente desarrollo de la industria hidrocarburífera en la Cuenca Neuquina en las últimas décadas no sólo ha aumentado considerablemente la demanda de agua, sino que ha puesto en riesgo los recursos hídricos de la misma. Para cumplimentar las normas ambientales y programar la profundidad de la cañería guía de los pozos hidrocarburíferos, es de suma importancia tener conocimiento de la profundidad máxima alcanzada por los acuíferos de baja salinidad. Por estas razones, entre otras, surge la evidente necesidad de tener el debido conocimiento de la localización y características de las reservas subterráneas de agua dulce, garantizando la protección y una eficiente gestión de este recurso tan valioso.

En el presente TFL, se identificaron niveles acuíferos a partir de la interpretación de perfiles eléctricos de pozos hidrocarburíferos y de sísmica 3D, en el área de concesión Agua del Cajón, ubicada en el sector este de la provincia del Neuquén. Se confeccionaron mapas en profundidad de los topes y bases de los principales niveles de interés.

1.1 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es el reconocimiento y análisis de potenciales niveles acuíferos dentro del área de concesión hidrocarburífera Agua del Cajón, comprendidos en los primeros mil metros de profundidad aproximadamente, a partir del análisis e interpretación de datos de pozos y datos sísmicos. De este modo, se contribuirá al público conocimiento de la hidrología del subsuelo en el área, permitiendo una mejor gestión del recurso.

1.2 Área de estudio

El área de estudio, Agua del Cajón (ADC), se encuentra en la Provincia del Neuquén, República Argentina. La misma está al NO de la localidad de Plottier y N de la localidad de Senillosa, a 28 km de la ciudad capital de Neuquén (Fig. 1). Abarca una superficie de 355.04 km². El área ADC, actualmente operada por la empresa Capex S.A., es una Concesión de Explotación No Convencional de Hidrocarburos, en la que existen pozos productores de gas y petróleo. El proyecto sísmico abarca las zonas centro y sur del área Agua del Cajón.

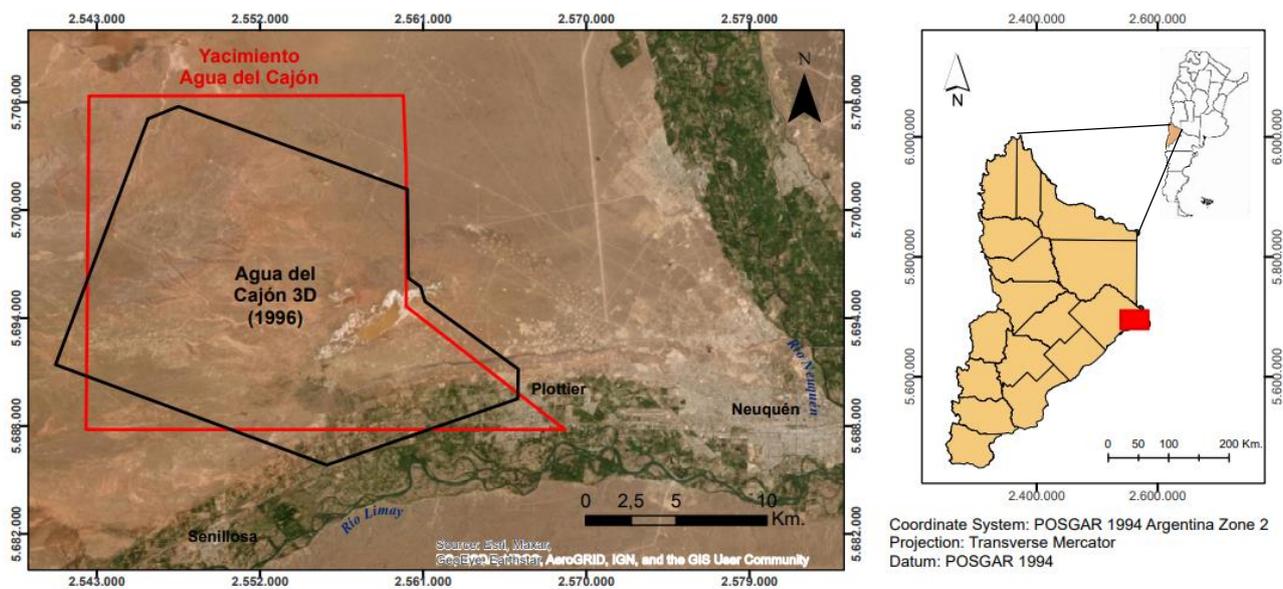
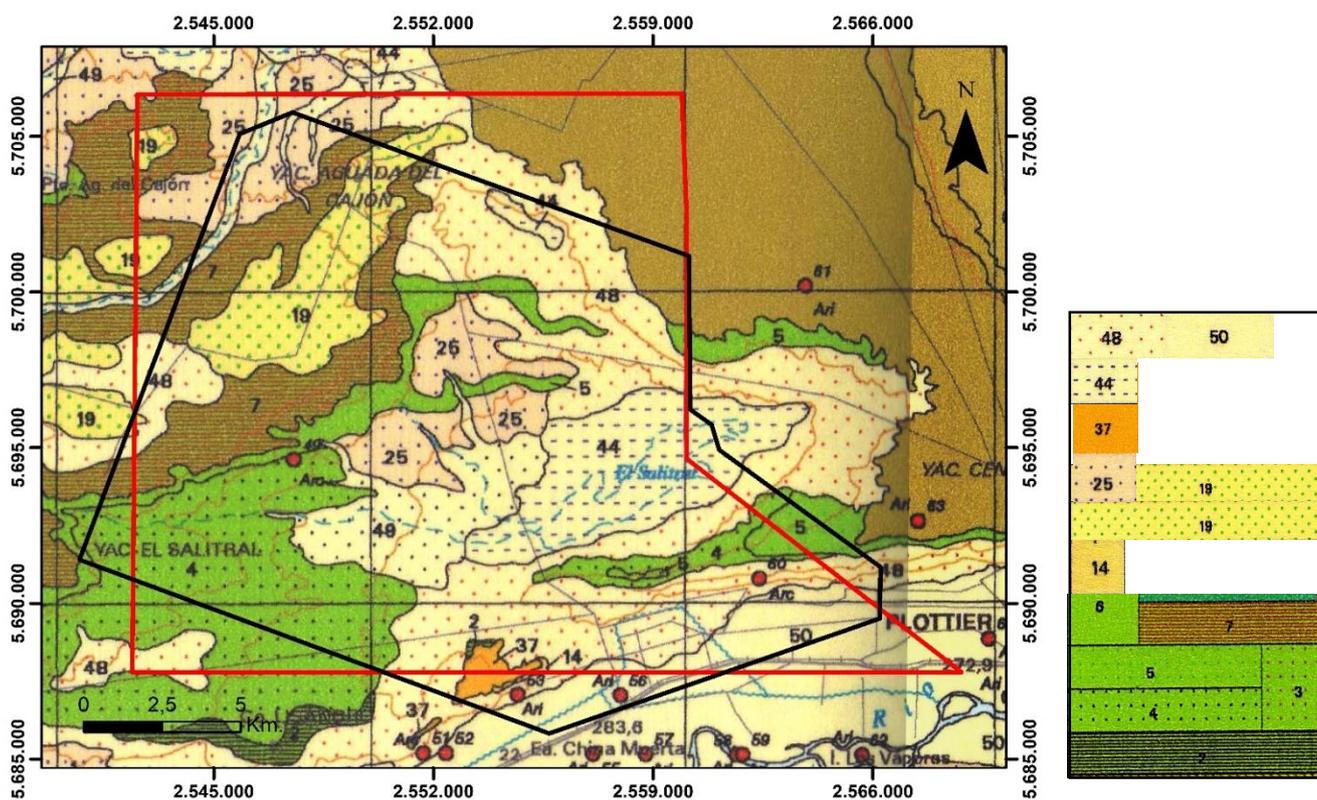


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio. Der.: ubicación en referencia a la Argentina y dentro de la Provincia del Neuquén. Izq.: ubicación en detalle sobre una imagen satelital. El polígono rojo indica el área del área Agua del Cajón y el polígono negro la cobertura del dato sísmico. Los datos para la elaboración del mapa fueron obtenidos de la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén.

2. Marco geológico

Geológicamente, el área de estudio está ubicada en el Engolfamiento de la Cuenca Neuquina y está afectada en el sector sur por la Dorsal de Huincul.

Las unidades aflorantes más antiguas en el área corresponden a depósitos del Cretácico Superior del Gr. Neuquén, Subgrupo Río Neuquén (Formaciones Portezuelo y Plottier) y Subgrupo Río Colorado (Fm. Bajo de la Carpa). También se observa un pequeño afloramiento de la Fm. Cerro Lisandro al sur. El resto del área está cubierta por depósitos aluviales, fluviales y eólicos modernos (Fig. 2). Como rasgo destacable en la zona centro-este del área se encuentra la laguna El Salitral.



- 50 DEPÓSITOS DE LAS PLANICIES ALUVIALES ACTUALES DE LOS RÍOS NEUQUÉN, LIMAY, RÍO NEGRO Y COLORADO. Gravas, arenas, limos, arcillas
- 48 DEPÓSITOS COLUVIALES. Gravas, bloques, arenas, limos.
- 44 DEPÓSITOS DE BAJOS Y LAGUNAS. Limos, arcillas, arenas, sales.
- 37 DEPÓSITOS FLUVIALES ANTIGUOS DEL RÍO LIMAY (Indiferenciados). Gravas, arenas.
- 25 DEPÓSITOS QUE CUBREN PEDIMENTOS CON NIVELES DE BASE LOCALES. Areniscas. Conglomerados
- 19 DEPÓSITOS QUE CUBREN EL I NIVEL DE PEDIMENTOS. Arenas y gravas
- 14 FORMACIÓN CHICHINALES. Tobas, tufitas, arcilitas, limolitas, areniscas
- 7 FORMACIÓN BAJO DE LA CARPA. Areniscas, fangolitas, conglomerados
- 6 SUBGRUPO RÍO COLORADO
- 5 FORMACIÓN PLOTTIER. Fangolitas y areniscas
- 4 FORMACIÓN PORTEZUELO. Areniscas, fangolitas
- 3 SUBGRUPO RÍO NEUQUÉN
- 2 FORMACIÓN CERRO LISANDRO. Fangolitas, areniscas

Figura 2. Unidades aflorantes en el área de estudio. Datos para la elaboración del mapa obtenidos de la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén y de la Hoja Geológica Neuquén 3969-II (Rodríguez *et al.*, 2007).

2.1 Cuenca Neuquina

La Cuenca Neuquina es un depocentro subandino localizado al sur de Sudamérica. Se ubica mayormente en la Provincia del Neuquén entre los 33° y 41° de latitud sur (incluye también las provincias de Mendoza, Rio Negro, La Pampa y parte de Chile), con un área de aproximadamente 120.000 km² (Casadío y Montagna, 2015).

Geoméricamente, a grandes rasgos presenta una forma triangular con dos sectores bien diferenciados: El Sector Andino hacia el oeste y el Engolfamiento Neuquino hacia el este. El primero se extiende elongado en dirección nor-noroeste, caracterizado por secuencias fuertemente deformadas por pliegues y corrimientos. El segundo corresponde a una extensa bahía en la cual la columna sedimentaria se encuentra mayormente en subsuelo, menos deformada.

Evolución geológica

La Cuenca Neuquina se generó sobre un basamento de rocas metasedimentarias-metaígneas e ígneas intrusivas, de edades que varían desde el Silúrico-Devónico al Permo-Triásico, vinculadas a la evolución de un orógeno en el margen convergente occidental de Gondwana (Cingolani *et al.*, 2011). Su historia evolutiva involucra el desarrollo de modelos tectónicos con complejos procesos de fusión, reciclaje cortical y colisiones de terrenos alóctonos o para-autóctonos (Cuyania, Chilenia, Patagonia) (Fig. 3). Estos últimos imprimen una herencia de fundamental importancia para toda la historia posterior de subsidencia y acumulación de sedimentos.

A partir del Triásico tardío - Jurásico temprano, la cuenca comienza su historia como receptora de sedimentos, la cual acumuló hasta la formación de la Cordillera de los Andes, casi 7000 m de depósitos jurásicos y cretácicos. Durante el Jurásico Inferior y Medio (Franzese *et al.*, 2003), se estableció en el sector occidental de Gondwana un régimen de subducción que conllevó a la generación del primer arco magmático mesozoico y a la generación de una serie de cuencas de retroarco e intraarco. La velocidad de subducción generó extensión detrás del arco, adelgazamiento de la corteza continental y así se creó un mayor espacio de “acomodación”, que originó las condiciones para que se produjeran transgresiones desde el Pacífico a través de aperturas en el arco (Spalletti *et al.*, 2000 y Macdonald *et al.*, 2003).

La etapa inicial de apertura de la Cuenca Neuquina, etapa de *syn-rift*, quedó caracterizada por la presencia de sedimentos continentales de ambientes aluviales y lacustres con abundante contenido piroclástico e intercalaciones de tobas y vulcanitas, agrupados dentro del Ciclo Precuyano. Durante este periodo, los depósitos de *syn-rift* habrían estado aislados, pero luego, en la etapa de *post-rift* o etapa de subsidencia termal (Jurásico temprano) estos tendieron a conectarse y cubrir gran parte del Engolfamiento Neuquino.

Durante el Jurásico Medio y hasta el Cretácico temprano la extensión cortical prosiguió dando lugar a potentes depósitos de sedimentos clásticos y carbonáticos, de origen tanto marino como continental, cuyos espesores superan los 5000 metros y comprenden a los Grupos Cuyo, Lotena, Mendoza y Bajada del Agrio, quienes representan la etapa de subsidencia termal (SAG) de la cuenca (Fig. 4).

Luego de la máxima expansión marina producida a fines del Jurásico-inicios del Cretácico, la cuenca experimentó una disminución progresiva del espacio de acomodación hasta su definitiva continentalización, producto del alzamiento y migración del arco volcánico. Es entonces cuando tuvo

lugar el inicio de una nueva etapa en la historia de la cuenca, la cual no volvió a recibir transgresiones marinas del Pacífico. Durante el Cretácico Tardío y Cenozoico, esta se vio afectada por diversos episodios de deformación en el sector occidental, los cuales para algunos autores se encontrarían relacionados a las variaciones del ángulo de subducción de la losa oceánica. En esta fase se inició la deformación y progresiva elevación de la región Andina mediante la reactivación de fallas normales de la fase de rift. Estos cambios marcaron el fin de la etapa de SAG, y comienzo de la etapa de antepaís (Arregui *et al.*, 2011). En esta última se depositan los sedimentos del Gr. Neuquén, conformado por depósitos clásticos continentales sinorogénicos.

A fines del Cretácico, el ascenso eustático global del Maastrichtiano impulsó una nueva transgresión marina al territorio neuquino, la cual provino por primera vez, desde el naciente Océano Atlántico. Las sedimentitas clásticas y carbonáticas de ambiente marino somero del Gr. Malargüe representan este evento.

Durante el Cenozoico la historia de la cuenca culmina con depósitos continentales principalmente fluviales. La evolución de la cordillera de los Andes durante el Paleógeno y Neógeno marcó etapas alternantes entre extensivas y compresivas, durante las cuales se crearon rasgos topográficos y depósitos volcánicos y sedimentarios asociados (Arregui *et al.*, 2011).

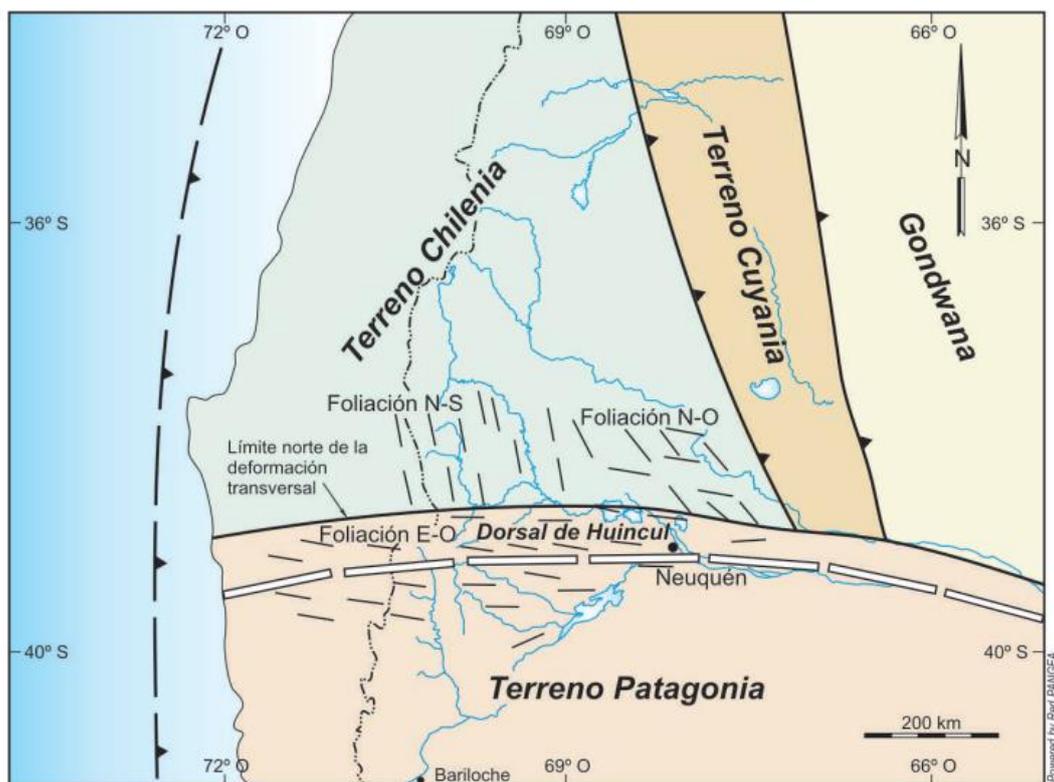


Figura 3. Acreción de los terrenos Cuyania, Chilenia y Patagonia al margen occidental de Gondwana. Ramos *et al.*, (2011).

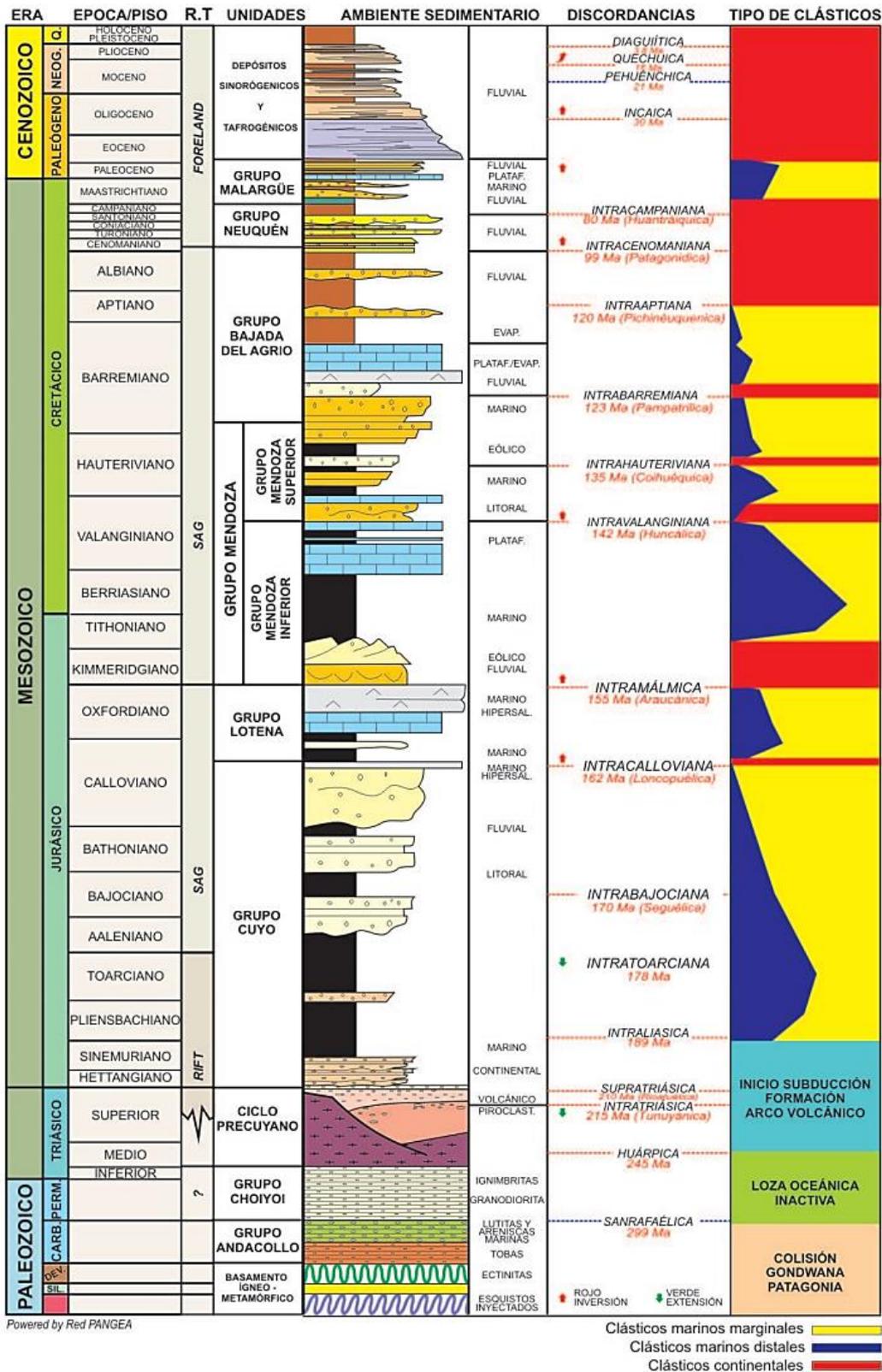


Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la Provincia del Neuquén. Arregui *et al.*, (2011).

Estructura

Alonso *et al.*, (2011), dividen a la cuenca Neuquina en seis regiones morfoestructurales (Fig. 5): La faja plegada, el Alto de los Chihuidos, la plataforma nororiental, la región del engolfamiento, la dorsal de Huincul y el sur de la dorsal. Por otro lado, Ramos *et al.*, (2011), dividen a la Provincia de Neuquén en tres provincias geológicas¹ distintivas: Las Cordilleras Principal y Patagónica y el Engolfamiento Neuquino. A su vez, el Engolfamiento Neuquino está dividido por la Dorsal de Huincul en dos depocentros, las subcuentas norte y sur.

A los fines de interés de este trabajo, se describirá en mayor detalle las características asociadas al Engolfamiento Neuquino y a la Dorsal de Huincul.

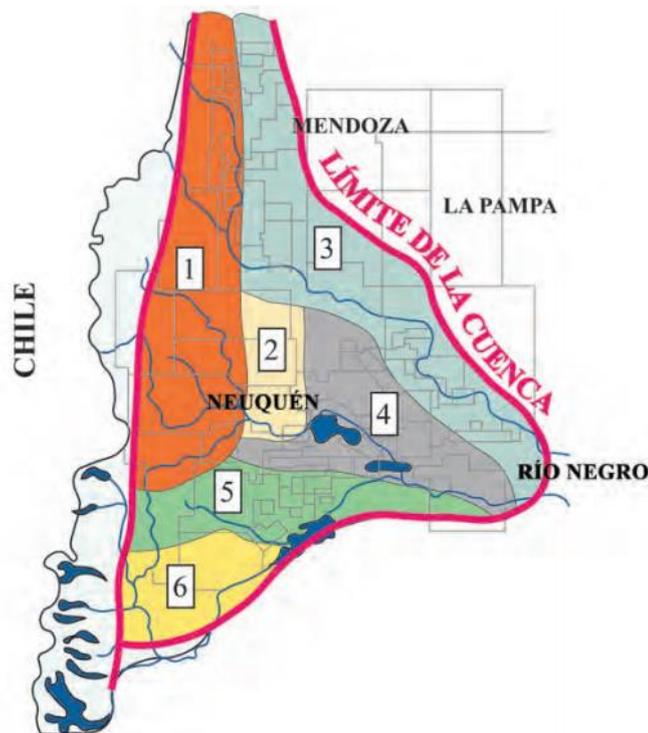


Figura 5. Regiones morfoestructurales de la Cuenca Neuquina. 1: Faja Plegada, 2: Alto de los Chihuidos, 3: Plataforma Nororiental, 4: Región del Engolfamiento, 5: Dorsal de Huincul, 6: Sur de la Dorsal (Casadío y Montagna, 2015).

Engolfamiento Neuquino

La Región del Engolfamiento posee una geometría triangular. Limita al noreste con el tren estructural El caracol-Charco Bayo y al sur con el flanco norte de la Dorsal de Huincul, con la que presenta un límite transicional. En esta zona de transición existen estructuras que corresponden a hemigrábenes jurásicos, los cuales habrían sufrido inversión tectónica, aunque las fallas reactivadas presentan un desplazamiento menor en comparación con las estructuras invertidas de la Dorsal (Casadío y Montagna, 2015).

¹ Se reconoce a una provincia geológica como una “región caracterizada por una determinada sucesión estratigráfica, un estilo estructural propio y rasgos geomorfológicos peculiares, siendo el conjunto expresión de una particular historia geológica” (Rolleri, 1976 en Ramos *et al.*, 2011).

La deformación en este ambiente geológico está representada mayormente por fallamiento extensional con un leve componente de desplazamiento de rumbo. El registro sedimentario en este sector es muy completo y de espesor importante sobre todo en la parte sur del “engolfamiento”, ya que los procesos erosivos asociados con discordancias estratigráficas o tectónicas aquí no afectaron significativamente a la sedimentación (Casadío y Montagna, 2015).

Dorsal de Huincul

La Dorsal de Huincul conforma un lineamiento estructural de 300 km de longitud desarrollado a los 39° S con una orientación preferencial E-O, transversal al orógeno andino. Conforman un rasgo morfoestructural sobresaliente en la cuenca, prácticamente dividiendo la misma en dos, ejerciendo un fuerte control en la erosión y sedimentación en sus cercanías. A grandes rasgos, la dorsal está constituida por un tren de estructuras fuertemente asimétricas y con vergencia predominante hacia el sur, las cuales tienen un rechazo vertical que llega a exceder los 1.5 km, involucrando desde el basamento paleozoico hasta los sedimentos del Cretácico Superior (Mosquera *et al.*, 2011).

Su evolución tectónica estuvo regida por dos factores principales, las anisotropías del basamento y la dinámica del margen convergente pacífico. La primera controló fuertemente la orientación y estilos estructurales de la deformación de intraplaca, en tanto que las variaciones en la dinámica del margen convergente definieron los ciclos de deformación (Ramos *et al.*, 2011). En el sector oriental de la dorsal de Huincul se desarrollaron estructuras transpresivas de orientación NO (Silvestro y Zuribi, 2008) (Fig. 6). La orientación de las estructuras generadas durante este estadio son paralelas a las estructuras gondwánides identificadas en el subsuelo de la Dorsal de Huincul, sugiriendo un paralelismo entre los dominios estructurales godwánides y mesozoicos de la Dorsal de Huincul (Mosquera *et al.*, 2011).

Por otro lado, Pangaro *et al.* (2009), describen la evolución de la dorsal en tres fases: una fase de rift, seguida de una fase de calma tectónica y una fase de deformación compresiva, siendo esta última la responsable de la configuración estructural actual. Estos autores afirman que “el principal control de las estructuras compresivas es la orientación del esfuerzo principal máximo y no la orientación de las estructuras de rift”. La evolución comenzó con el desarrollo de sistemas de hemigrábenes, en concordancia a la etapa de sinrift, de orientación noroeste a oeste-noroeste, típicamente con el bloque hundido al norte. Estos son rellenados por depósitos que abarcan desde el Triásico Superior hasta fines del Jurásico Inferior. Dichos autores presumen que esta orientación podría estar mal interpretada como este-oeste debido a la fuerte impronta de las estructuras compresivas desarrolladas posteriormente. Desde el Toarciano inferior al superior, domina un régimen exclusivamente térmico y de alcance regional. Se cree que el aporte sedimentario proveniente desde el sur-sureste no experimentó entonces ningún obstáculo de origen tectónico para su sedimentación en la zona de la dorsal. La deformación compresiva de orientación preferencial este-oeste y este-noreste comenzó a fines del Toarciano superior a Aaleniano. Se destaca que su desarrollo es prácticamente indiferente a las estructuras extensionales previas. Sin embargo, como señalan Silvestro y Zuribi (2008), y luego Mosquera *et al.*, (2011), en las proximidades de la dorsal neuquina, la inversión tectónica oblicua sí tendría relevancia en la deformación compresiva.

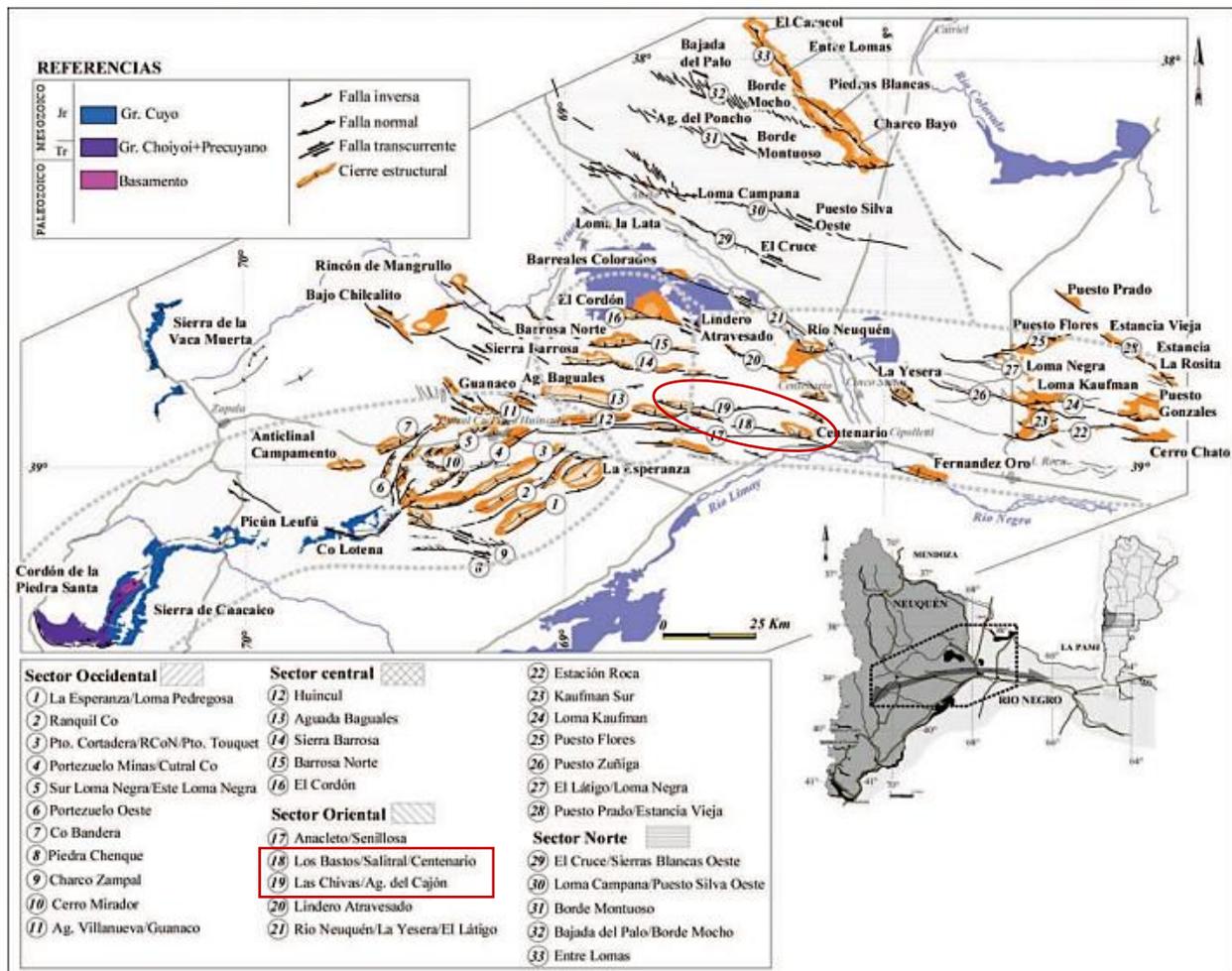


Figura 6. Principales lineamientos estructurales de subsuelo y afloramientos relacionados a la dorsal de Huincul. Se señalan aquellos correspondientes al área de estudio. Modificada de Silvestro y Zuribi, (2008).

2.2 Unidades estratigráficas de interés hidrológico

Dentro de la extensa columna sedimentaria de la cuenca, sólo los niveles más superficiales han sido identificados con potencial acuífero, siendo el Gr. Neuquén y la Fm. Rayoso los objetivos recurrentes. Se describen a continuación las formaciones involucradas en el presente estudio.

Grupo Bajada del Agrio

Esta denominación fue propuesta por Méndez *et al.*, (1995) para agrupar a las Formaciones Huitrín (Miembros Troncoso, La Tosca y Salina) y Rayoso (Miembros Rincón, Quili Malal, Pichi Neuquén y Cañadón de la Zorra). Se interpreta como Gr. Bajada del Agrio a aquel que incluye a las sedimentitas que se desarrollan entre el Gr. Mendoza y el Gr. Neuquén, o más precisamente, entre el techo de la Fm. Agrio y la base de la Fm. Candeleros (Leanza *et al.*, 2005).

Formación Rayoso

Herrero Ducloux (1946) definió a la Fm. Rayoso como “todo el conjunto de capas que siguen en concordancia sobre el Yeso de Transición y que hacia arriba están limitadas por la discordancia Intersenoniana”. Actualmente hoy se conoce al “Yeso de Transición” como Mb. La Tosca de la Fm.

Huitrín. La discordancia Intersenoniana se conoce también con el nombre de discordancia Patagónica, la cual se encuentra en la base del Gr. Neuquén, donde usualmente se aprecia el rasgo geométrico de angularidad tanto en subsuelo como en afloramiento (Alonso, 2016).

La Fm. Rayoso está compuesta por una unidad clástico-evaporítica (areniscas, fangolitas rojas, evaporitas y carbonatos) que alcanza hasta 1200 m de espesor y tiene una amplia distribución en la cuenca neuquina (Zavala y Ponce, 2011). La misma se depositó en un medio predominantemente continental, marcando la desconexión definitiva de la cuenca con el océano Pacífico. Su edad corresponde al Aptiano superior-Albiano, estimado a partir de registros paleoflorísticos y relaciones relativas (Leanza, 2003)

Grupo Neuquén

El Gr. Neuquén está conformado por una sucesión de depósitos continentales de origen fluvial, eólico y lacustre somero, los cuales alcanzan los 1200 m de espesor. Su depositación comenzó luego de la denominada Fase Miránica Principal (Stipanovic y Rodrigo, 1970) de los movimientos Patagónicos, expresada por la discordancia Intersenoniana o Patagónica. Su límite superior está dado por la discordancia Huantráiquica. Su edad está definida entre el Cenomaniano inferior y el Campaniano medio (Cretácico Superior). El mismo se subdivide litoestratigráficamente en tres subgrupos y nueve formaciones (Garrido, 2011) (Fig. 7).

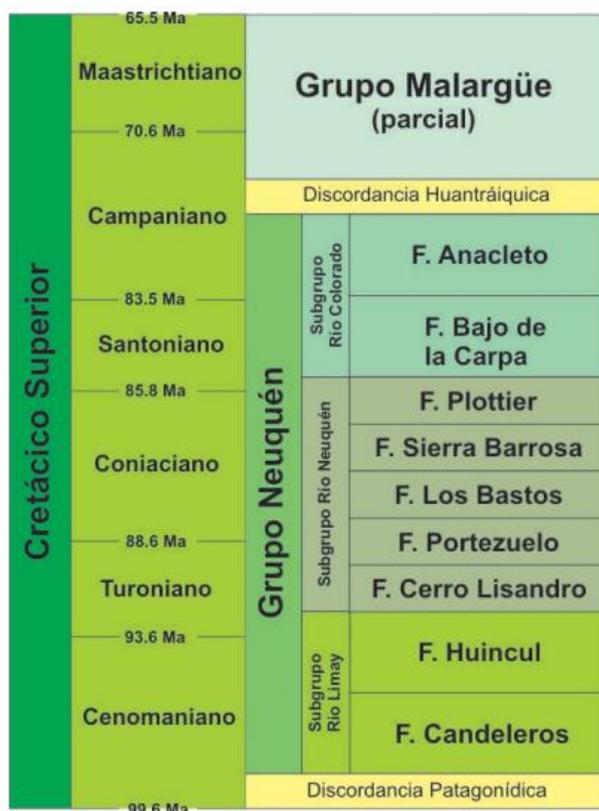


Figura 7. Esquema litoestratigráfico del Gr. Neuquén (Garrido, 2011).

Subgrupo Río Limay

El Subgrupo Río Limay comprende a las Formaciones Candeleros y Huincul, compuestas por depósitos fluviales desarrollados bajo un control tectónico y climático subordinado. Los mismos se componen principalmente de areniscas cuarzolíticas de granulometría variada, con alternancia de fangolitas y escasos horizontes conglomerádicos (Garrido, 2010).

Formación Candeleros

Como ya se mencionó, dicha formación se define a partir de la discordancia Patagónica. En el ámbito de la Dorsal de Huincul, varios autores destacaron la relación de discordancia angular que exhibe esta unidad en contacto con las unidades subyacentes (Garrido, 2010). Uliana *et al.*, (1975a, 1975b) demostró la existencia de un plano erosivo regional de bajo ángulo, que corta oblicuamente de sur a norte a la sección superior de la Fm. Rayoso. Por esto, dicha discontinuidad fue establecida como la base del Gr. Neuquén.

La Fm. Candeleros se compone litológicamente por “areniscas cuarzolíticas finas a gruesas, con granos subangulosos a subredondeados y moderada a buena selección”; la fracción dominante varía en función de la posición geográfica. Dicha unidad se destaca por la presencia de una abundante matriz fangosa de coloración morada a rojo hígado. El espesor máximo estimado varía entre los 300 m (Cazau y Uliana, 1973) y los 200 m (Garrido, 2010).

En base a estudios petrológicos, Marchese (1971) clasificó a las areniscas como “ortofeldespatitas con abundante material ceolítico, analcima y heulandita”. Por otro lado, la fracción pelítica está formada en mayor medida por montmorillonita, con caolinita e illita subordinadas (Di Paola y Marchese, 1970 y Di Paola, 1973).

Formación Huincul

La Fm. Huincul se conforma por “areniscas cuarcíticas y cuarzolíticas de granulometría variable, con escasa matriz y moderado contenido de cemento carbonático” (Garrido, 2010). Su típico color verde-amarillento claro la caracteriza y distingue de la unidad inferior (Leanza y Hugo, 2001). La unidad puede subdividirse en dos secciones. La inferior, de hasta 70 m de espesor, está dominada por clásticos finos con ocasionales lentes gravosos. En la superior, de hasta 185 m de espesor, se desarrollan areniscas medianas a gruesas, a veces conglomerádicas, con intercalaciones de granulometrías menores. Hacia el tope de la misma aumenta la fracción fangosa a la vez que disminuye la fracción psamítica.

Estudios petrológicos clasificaron a las areniscas de la Fm. Huincul como “ortolitoquarcitas con cemento calcítico” (Marchese, 1971). En cuanto a la fracción pelítica, se la ha clasificado como predominantemente caolinítica (Di Paola y Marchese, 1970) y como “dominada por argilominerales illíticos con participación menor de caolinita + clorita” (Pettinari y Barredo, 1994 y Pettinari *et al.*, 1999).

La Fm. Huincul suprayace concordantemente a la Fm. Candeleros (Leanza y Hugo, 2001), presentando un contacto neto y erosivo. En el área central y oriental de la cuenca, el contacto entre estas suele ser difuso. Una característica para diferenciarlas, es la baja a nula proporción de matriz

fangosa en la base de la Fm. Huincul, siendo las areniscas más bien límpidas (Garrido, 2010). El límite superior de la unidad está dado por una discontinuidad regional (*hiatus*), sin embargo no siempre es fácil su distinción, dado que suprayacen a ésta depósitos principalmente pelíticos de la Fm. Cerro Lisandro, confundibles con los niveles fangolíticos de la primer unidad.

Subgrupo Río Neuquén

El Subgrupo Río Neuquén comprende a las Formaciones Cerro Lisandro, Portezuelo, Los Bastos, Sierra Barrosa y Plottier, conformando una sucesión alternante de unidades psamíticas y pelíticas de origen fluvial, desarrolladas principalmente bajo control climático. El predominio de la fracción pelítica o psamítica define cada unidad formacional. Sin embargo, el pasaje entre una y otra es de carácter transicional lo cual dificulta usualmente la distinción de límites (Garrido, 2010).

Formación Cerro Lisandro

La Fm. Cerro Lisandro está compuesta predominantemente por fangolitas rojas, con delgadas intercalaciones de limolitas y areniscas que en exámenes detallados muestran un aspecto heterolítico (Garrido, 2010). La fracción clástica está conformada por granos de cuarzo, plagioclasa ácida y feldespato potásico, con fragmentos líticos de plutonitas, vulcanitas ácidas y sedimentitas cuarzosas (Di Paola, 1973). En la fracción arcillosa predomina la illita, con montmorillonita subordinada. El espesor máximo estimado se encuentra entre los 45-70 m (Garrido, 2010) hasta 98 m (Ramos, 1981).

En general, sus límites inferior y superior son difíciles de distinguir. Como ya se mencionó, dicha unidad se dispone concordante sobre la Fm. Huincul. Su límite superior es de carácter transicional hacia los depósitos arenosos de la Fm. Portezuelo.

Formación Portezuelo

La Fm. Portezuelo está comprendida por una sucesión de psamitas y pelitas interestratificadas, siendo en general la fracción clástica arenosa la dominante. Las areniscas son cuarzo-feldespáticas y cuarzolíticas, predominantemente medianas, con bajo contenido de matriz y cemento carbonático. La composición de las mismas es similar a las de la Fm. Cerro Lisandro. Las pelitas se componen mayormente de fangolitas rojizas, de composición illítica con montmorillonita y caolinita subordinadas (Di Paola, 1973).

Al igual que dicha formación apoya en concordancia y de manera transicional con la unidad subyacente, ocurre entre su techo y las sedimentitas de la unidad suprayacente, dificultando en muchos casos la distinción exacta de sus contactos.

3. Marco teórico – metodológico

3.1 Hidrogeología

Se define a la hidrología subterránea o hidrogeología como «aquella parte de la Hidrología que corresponde al almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre» (Custodio y Llamas, 1983). Para algunos autores, la hidrogeología se ocupa del estudio de las formaciones geológicas que puedan proporcionar agua suficiente para satisfacer las necesidades humanas.

La hidrogeología es sin dudas una materia interdisciplinaria en la cual, para una finalidad concreta, es preciso aplicar las leyes y métodos de otras disciplinas.

Ciclo hidrológico. Movimiento del agua

Se le llama ciclo hidrológico al movimiento general de las masas de agua de un sitio a otro y de un estado a otro. Este movimiento es causado fundamentalmente por dos factores: el Sol, proporciona la energía para evaporar el agua; y la gravedad, causante de la precipitación del agua condensada y el movimiento hacia zonas más bajas (Fig. 8).

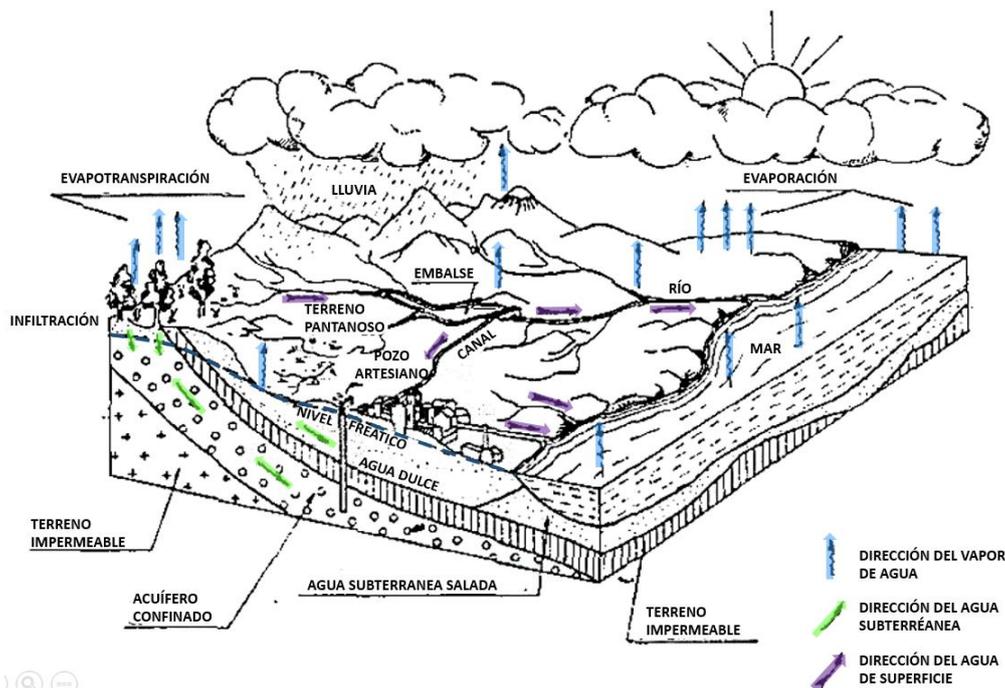


Figura 8. Esquema del ciclo hidrológico (Custodio y Llamas, 1983).

Definición y clasificación de acuíferos. Unidad hidrogeológica

Custodio y Llamas (1983) definen acuífero (del latín *aqua* = agua y *fero* = llevar) como “aquel estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades”. La idea de que una roca sea aprovechable económicamente es relativa al uso de la

misma. En realidad, casi todas las formaciones pueden en alguna medida permitir circulación de agua. En función de cuán eficiente sea esto, será considerado buen o pobre acuífero, pero acuífero en fin.

En función de su comportamiento hidrológico los acuíferos pueden clasificarse en acuíferos propiamente dichos, acuíclados, acuitardos y acuífugos.

- Acuífero: Aquellas formaciones que contienen agua y permiten su circulación a través de ellas con facilidad. Ejemplos típicos son gravas, arenas o areniscas poco cementadas.
- Acuíclado: del latín *claudere*, encerrar o cerrar. Aquellas formaciones que, aun conteniendo agua hasta la saturación, no la transmiten y por esto no es posible su explotación. En este grupo se incluyen por lo general a las arcillas.
- Acuitardo: del latín *tardare*, retardar. Dicho término hace referencia a aquellas formaciones que contienen agua, pero la transmiten muy lentamente, por lo que tampoco son aptos para explotación. Sin embargo, pueden tener la capacidad de constituir una recarga vertical de otros acuíferos. Por ejemplo, un nivel de arcillas limosas o arenosas.
- Acuífugo: del latín *fugere*, huir. Estas ni tienen agua, ni la pueden transmitir. Son ejemplos los granitos o las rocas metamórficas no alteradas ni meteorizadas o fracturadas.

Por otro lado, los acuíferos se pueden clasificar de acuerdo con la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos en libres, confinados y semiconfinados (Fig. 9). Esta distinción tiene mucha importancia ya que definirá el comportamiento del acuífero a la hora de ser explotado.

- Acuíferos libres, no confinados o freáticos: Son aquellos cuyo límite superior (la superficie freática) está a presión atmosférica.
- Acuíferos confinados, cautivos o a presión: Son aquellos que se encuentran entre dos capas impermeables (o acuífugos). El agua en estos está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa la totalidad de los vacíos de la formación que la contiene.
- Acuíferos semicautivos o semiconfinados: Estos podrían considerarse como un caso especial de los anteriores, ya que son acuíferos también a presión mayor que la normal, pero en los que alguna de las capas confinantes son semipermeables (acuitardos) por lo que pueden recibir filtraciones o rezumes verticales a través de estas.

Una unidad hidrogeológica es un conjunto de formaciones geológicas consideradas conjuntamente en términos hidrogeológicos, ya que su funcionamiento está conectado y debe ser estudiado en concordancia. Dicha agrupación será subjetiva, dependiendo de la escala y los objetivos del trabajo.

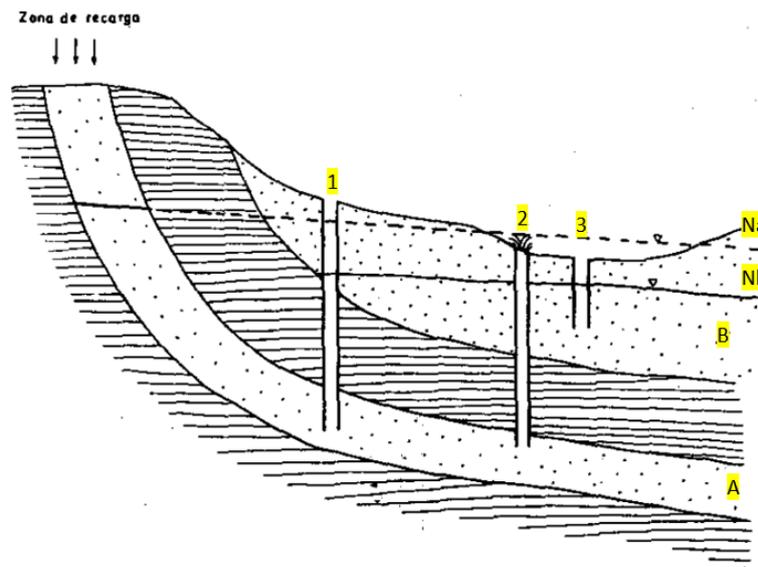


Figura 9. Tipos de acuíferos. A) Acuífero cautivo, confinado o a presión; B) Acuífero libre, no confinado o freático; Na) Nivel piezométrico del acuífero cautivo; Nb) Nivel piezométrico del acuífero libre; 1) Pozo en un acuífero cautivo no surgente; 2) Pozo en un acuífero cautivo surgente; 3) Pozo en un acuífero libre. Custodio y Llamas (1983).

3.2 Propiedades físicas de las rocas

Porosidad

Se define como porosidad (Φ o PHI) al volumen de poros por unidad de volumen de roca (Ecuación 1); es la fracción del volumen total de una muestra que está ocupada por poros o vacíos. Esta puede clasificarse en porosidad primaria, si existe en la roca desde que la misma se depositó, o secundaria, si fue causada posterior a la depositación por la acción de aguas de formación o fuerzas tectónicas. Por definición es adimensional y debe usarse de esa manera en cálculos. Sin embargo, es común expresarla en porcentaje. Por otro lado, se denomina porosidad efectiva al volumen de poros interconectados, que contribuyen al flujo de fluidos o a la permeabilidad. Esta última excluye los poros aislados y el volumen de los poros ocupado por el agua adsorbida a partículas de arcilla.

$$\Phi = \frac{\text{Volumen de fluidos}}{\text{volumen de roca}} \quad \text{Ecuación [1]}$$

Saturación de agua

La saturación (S) de una formación es la fracción del volumen poral que está ocupado por el fluido considerado. De esta manera, la saturación de agua (S_w) es la fracción del volumen poral que contiene agua. Al igual que la porosidad, es adimensional, aunque suele expresarse en porcentaje. En el caso de acuíferos, la saturación de agua es 1 (100%), ya que la totalidad del volumen poral está ocupada por agua.

Permeabilidad y conductividad hidráulica

La permeabilidad (k) es una medida de cuán fácil los fluidos pueden fluir a través de una roca. Para que una roca sea permeable, esta debe tener poros interconectados, capilares o fracturas. Por lo tanto, existe una relación entre la porosidad y la permeabilidad. La unidad de medida de la permeabilidad es el Darcy, pero comúnmente se expresa en su milésima parte, el milidarcy (mD).

En hidrología subterránea se emplea el término conductividad hidráulica (K), para definir la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. La conductividad hidráulica se expresa en cm/seg.

Resistividad y conductividad eléctrica

La resistividad eléctrica (R) de una sustancia se define como su habilidad para impedir el flujo de una corriente eléctrica a través de ella. La unidad de medida usada es el ohm.m²/m, usualmente escrito como ohm.m. La conductividad eléctrica es el recíproco de resistividad y se expresa en siemens por metro (S/m).

Resistividad del agua de formación y resistividad de formación. Factor de formación

La resistividad del agua (R_w) depende de su salinidad y temperatura. Cuanto mayor es la concentración salina, mayor es la conductividad (y menor la resistividad). La conductividad de una solución también aumenta con la temperatura, debido a la mayor movilidad de iones. La concentración de una solución suele expresarse en gramos de sal por litro de solución (g/l); al ser el volumen función de la temperatura, la concentración expresada de esta manera es también función de ella. Si se desea expresar la concentración de forma independiente, se utiliza peso de sal por peso de solución. La unidad más común en este caso es partes por millón (ppm), que equivale a miligramos de sal por kilogramo de solución.

La resistividad de una roca limpia completamente saturada en agua, es proporcional a la resistividad del agua con la cual está saturada. Esta proporcionalidad se define a través de una constante llamada factor de resistividad de formación o factor de formación (F). De esta manera, siendo R_o la resistividad de una roca limpia 100% saturada en agua con una resistividad R_w :

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad \text{Ecuación [2]}$$

El factor de formación está inversamente relacionado con la porosidad. Dada una cierta agua de formación, cuanto mayor sea la porosidad de la formación, menor será la resistividad R_o y menor será el factor de formación F . Basado en observaciones, Archie (1942) propuso una fórmula que relaciona estos dos factores (F y Φ) de la siguiente manera:

$$F = \frac{a}{\Phi^m} \quad \text{Ecuación [3]}$$

Siendo m el factor de cementación y a una constante empírica.

A lo largo de los años se han propuesto y aceptado las siguientes relaciones, basadas en la litología o estructura poral:

- $F = \frac{0.62}{\Phi^{2.15}}$ para arenas no consolidadas
- $F = \frac{1}{\Phi^2}$ para formaciones compactadas

3.3 Perfiles o registros de pozos

Los perfiles o registros de pozo son mediciones de una o más propiedades de las formaciones atravesadas, que se registran dentro del pozo. Las mismas se registran en función de la profundidad. A través de estas mediciones se interpretan propiedades geológicas y petrofísicas de las rocas y de los fluidos presentes en estas.

Registro de Rayos Gamma Naturales

La curva de rayos gamma (GR) es un registro del tipo pasivo que mide en grados API la radiación natural emitida espontáneamente desde las formaciones hacia un detector de centelleo. Estas radiaciones son resultado de la desintegración de elementos de la serie U-Th y del isótopo K^{40} (Comisión Nacional del Agua, 2007). Dado que generalmente estos elementos se acumulan en rocas sedimentarias arcillosas, dicho registro se utiliza, además de para la correlación general, como un indicador del contenido de arcilla, en donde se destaca un alto nivel de radiactividad a diferencia de formaciones “limpias” (libres o con menor contenido de arcilla). Se observan también altos valores de GR en rocas contaminadas con sales de potasio o por ceniza volcánica (Fig. 10).

Las unidades en API en formaciones sedimentarias generalmente varían entre unas pocas unidades API en anhidrita/sal, a 200 o más en arcillas. La cantidad de rayos gamma recibidos por el detector no sólo es función de la radioactividad de las formaciones sino también de las condiciones del pozo (Khatchikian, 2011). Cuando el registro de rayos gamma se utiliza para correlacionar, no se requiere ninguna corrección, pero para aplicaciones cuantitativas, una corrección puede ser necesaria si el diámetro del pozo se ve muy alterado en zonas de arcillas (o bien se expanden y disminuyen el diámetro del pozo, o bien se desmoronan formando cavernas, reflejando grandes calibres).

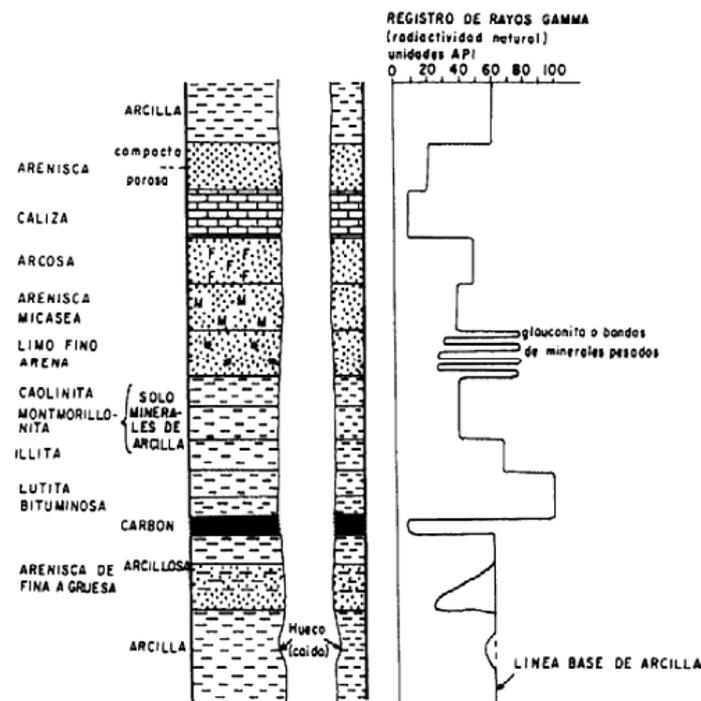


Figura 10. Respuestas típicas de rayos gamma naturales. Comisión Nacional del Agua (2007).

Registro de Potencial Espontáneo

El registro de potencial espontáneo (SP), es un registro del tipo pasivo que mide (en mV) la diferencia de potencial natural que existe entre un electrodo móvil dentro del pozo y otro fijo en superficie. Las corrientes eléctricas (potenciales espontáneos naturales) son producidas por fuerzas electromotrices en las formaciones que pueden ser de origen electroquímico o electrocinético, y se deben a la diferencia de salinidad entre el fluido de perforación y la formación.

El componente electroquímico del SP es el más importante y se produce por dos fenómenos denominados potencial de junta líquida y potencial de membrana. El primero se observa cerca de la zona de contacto entre una capa arcillosa y una permeable, y el segundo sucede lejos del contacto con una capa arcillosa (Comisión nacional del agua, 2007).

El valor de la respuesta plana se llama “línea base de arcillas o lutitas”. Esto sucede ya que al ser estas rocas impermeables, no existe en ellas ninguna corriente eléctrica. Al contrario, a la máxima deflexión del SP se la denomina Potencial Espontáneo Estático (SSP), que representaría el caso ideal de una capa de arenas permeables libre de arcilla.

En el mejor de los casos, la medición del SP permite la identificación de zonas permeables y la determinación de la resistividad del agua. Una deflexión indica que una zona es porosa y permeable y tiene agua con una concentración iónica diferente al lodo de perforación. El SP también es utilizado para determinar la arcillosidad de una capa (Ellis y Singer, 2008).

La limitante principal de dicho perfil en estudios de agua subterránea, es el rango de diferencias de salinidad entre el fluido de perforación y el fluido de la formación en ambientes de agua dulce. Como se ve en la Fig. 11, si el fluido de perforación de base agua es más dulce que el agua de formación, la curva de SP tiene una deflexión negativa frente a capas de arenas (respuesta típica en pozos de petróleo). Si estas salinidades se invierten, también lo hará la respuesta del SP. Por lo tanto, existe una gama de posibilidades de respuesta muy grande, incluyendo un SP nulo (línea recta), cuando no hay diferencia de salinidades entre los fluidos. Sin embargo, el agua dulce genera potenciales muy bajos o nulos dado que en la gran mayoría de las perforaciones utilizadas en la exploración de agua subterránea se utiliza agua en lugar de lodo, la cual tiene una naturaleza y calidad muy similar a las formaciones atravesadas (Comisión nacional del agua, 2007).

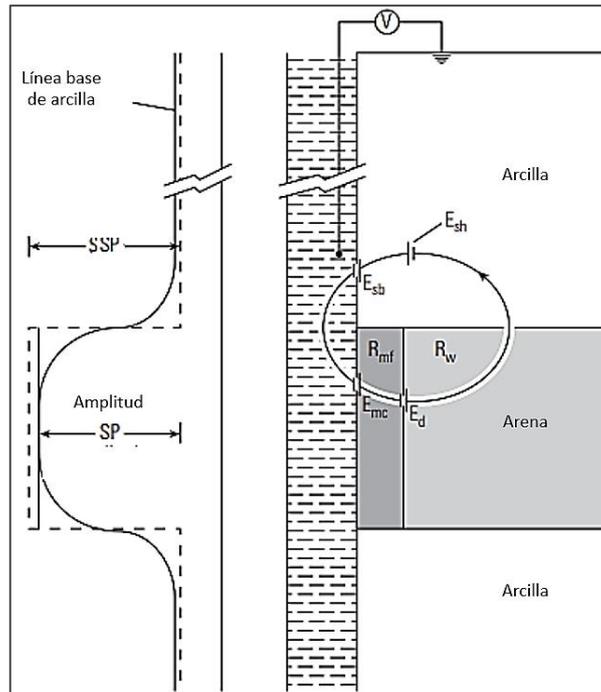


Figura 11. Representación esquemática del desarrollo del potencial espontáneo en un pozo. Ellis y Singer (2008).

Registro sónico (o acústico)

El perfil sónico registra, en $\mu\text{s}/\text{ft}$ (microsegundos por pie), el tiempo que tarda una onda compresional de sonido, emitida por un transmisor, en atravesar un pie de formación. La energía acústica viaja a través del fluido en las paredes del pozo y a través de las rocas circundantes a una velocidad que está asociada principalmente a la mineralogía de la matriz y la porosidad de las rocas. Este tiempo, llamado tiempo de tránsito (ΔT), en general será menor cuanto mayor sea la densidad de la unidad, por lo tanto, si se conoce las características de la formación y sus fluidos, pueden sacarse conclusiones respecto a su porosidad (Keys, 1990).

El tiempo de tránsito promedio decrece, o la velocidad sónica promedio aumenta, con la profundidad y con el aumento de la dureza o cementación de las rocas. En las figuras 12 y 13, se muestran respuestas típicas de las rocas frente a este registro.

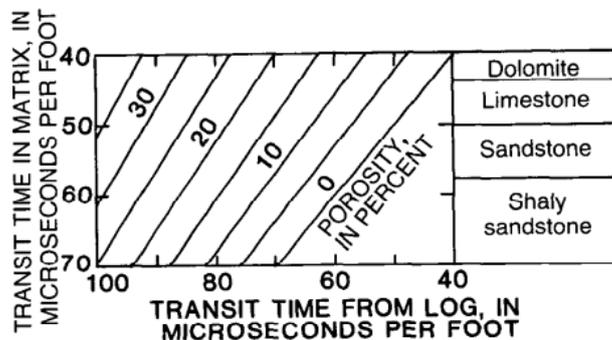


Figura 12. Tiempo de tránsito de distintos tipos de rocas, en función del porcentaje de porosidad. Keys (1990).

Rock or fluid type	Velocity (feet per second)	Transit time (microseconds per foot)
Sandstone		
Slightly consolidated	15,000-17,000	58.8-66.7
Consolidated	19,000	52.6
Shale	6,000-16,000	62.5-167.0
Limestone	19,000-21,000+	47.6-52.6
Dolomite	21,000-24,000	42.0-47.6
Anhydrite	20,000	50
Granite	19,000-20,000	50.0-52.5
Gabbro	23,600	42.4
Freshwater	5,000	200
Brine	5,300	189

Figura 13. Velocidad de una onda compresional y tiempo de tránsito en distintos tipos de rocas y fluidos comunes. Los valores únicos son promedios. Keys (1990).

Registro de resistividad

La electricidad puede pasar a través de una formación solo gracias al agua conductiva que esta contiene. Salvo algunas pocas excepciones, las rocas secas son muy buenos aislantes. Por esto, las formaciones en subsuelo tienen resistividades finitas y susceptibles a ser medidas gracias al agua contenida en sus poros o absorbida intersticialmente en arcillas (Fig. 14).

La resistividad de las formaciones se mide o enviando corriente hacia la formación y midiendo el descenso del flujo eléctrico a través de esta (lateroperfiles) o induciendo una corriente eléctrica en la formación y midiendo su magnitud (perfiles inductivos). Los lateroperfiles funcionan cuando el lodo de perforación es conductivo, mientras que los inductivos funcionan con toda clase de lodos, incluso aire y espuma, razón por la cual este último pasó a ser la herramienta de resistividad más utilizada en la actualidad.

La resistividad de la formación depende principalmente de la resistividad del agua de formación, la cantidad de agua presente y la geometría de los poros (Schlumberger, 1989).

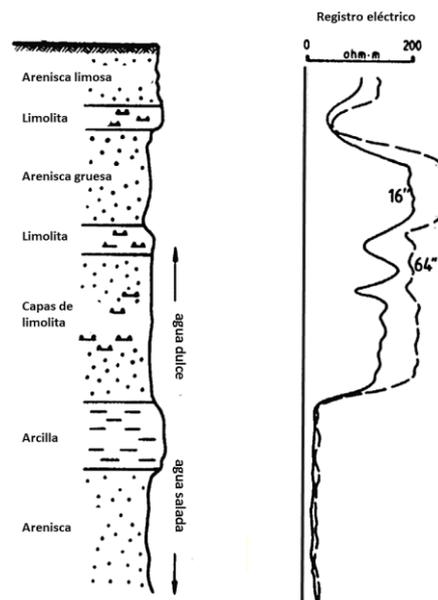


Figura 14. Respuesta típica del perfil resistivo para una secuencia de rocas sedimentarias. Modificado de Wonik y Hinsby, (2006).

Determinación de propiedades hidrológicas a partir de registros eléctricos

Como referencia para el cálculo de propiedades hidrológicas se tomaron como antecedentes los trabajos de: Alonso *et al.*, (2016), quienes realizaron una caracterización hidrogeológica de la Fm. Rayoso y Gr. Neuquén en el sector centro-norte de la Provincia del Neuquén a partir de registros de pozo utilizados en la industria hidrocarburífera en conjunto con información de pozos de agua. Magnano L., (2018), utilizó registros geofísicos de pozos para determinar las tendencias de salinidad presentes en acuíferos por sobre la Fm. Vaca Muerta en la Cuenca Neuquina; en la misma menciona al perfil de resistividad inductivo profundo como el método geofísico de pozo más confiable para el área de estudio, mientras que los perfiles Rayos Gamma (GR) y Potencial Espontáneo (SP) fueron utilizados como métodos complementarios para la determinación de capas permeables con contenido de agua. Alberti R. y Sticco M., (2017), realizaron un estudio hidrológico en el área de Lindero Atravesado en el cual determinaron las unidades acuíferas de baja salinidad a partir de registros eléctricos y destacaron la utilidad de los perfiles sónico y resistivo como guía para la determinación de capas compactadas y/o cementadas.

❖ Determinación del volumen de arcillas a partir del registro de rayos gamma naturales

El contenido de arcillas (V_{sh}) puede estimarse a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{sh}(GR) = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad \text{Ecuación [4]}$$

Donde:

- $V_{sh}(GR)$ = volumen de arcilla en la roca del registro gamma
- GR = valor de rayos gamma del registro
- GR_{min} = valor mínimo de rayos gamma (formaciones limpias) - línea base de arena
- GR_{max} = valor máximo de rayos gamma (arcillas) - línea base de arcilla

Ya que los GR medidos incluyen la radioactividad emitida por fuentes diferentes a las arcillas, el resultado de la ecuación puede ser una sobreestimación del V_{sh} .

De acuerdo con Khatchikian (2011), existen ciertas limitaciones al método que consisten en:

- Pueden no existir formaciones “limpias” en el intervalo estudiado. En dicho caso se debe utilizar un valor arbitrario de GR_{min} .
- El volumen de arcilla calculado es mayor al real cuando las formaciones contienen minerales radioactivos, como micas y feldespatos alcalinos.
- Si las arcillas predominantes no contienen potasio, como la caolinita o la montmorillonita, no se observará mucho contraste entre arenas y arcillas.

❖ Determinación de la porosidad a partir del registro sísmico

En 1956, M.R.J Wyllie observó mediante ensayos de laboratorio que la velocidad sísmica máxima alcanzada, la cual denominó *terminal velocity*, dependía de la porosidad y de las velocidades de la roca y del fluido. La ecuación 5 expresa esa relación en términos de tiempo de tránsito.

$$\Delta t = \phi \Delta t_f + (1 - \phi) \Delta t_{ma} \quad \text{Ecuación [5]}$$

De donde se deriva:

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad \text{Ecuación [6]}$$

Donde:

- Δt = Lectura del registro sísmico
- Δt_{ma} = Tiempo de tránsito de la matriz. Los valores típicos se muestran en el Anexo 1
- Δt_f = Tiempo de tránsito del fluido; generalmente se usa 189 $\mu\text{s}/\text{ft}$ (Comisión Nacional del Agua, 2007)

La ecuación 6, también llamada *time average* o ecuación de Wyllie, es generalmente válida para formaciones limpias y consolidadas, con pequeños poros distribuidos de manera uniforme. Cuando se quiere calcular la porosidad de materiales no consolidados o insuficientemente compactados, es necesario aplicar un factor de corrección empírico C_p de entre 1 y 1.5 (Ecuación 7). Esto se debe a que la presión de confinamiento es menor a la necesaria para que se cumpla la ley de tiempos promedio de Wyllie, y por lo tanto disminuye la velocidad del sonido en la formación, lo que resulta en valores muy altos de porosidad.

$$\phi_c = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \frac{1}{C_p} \quad \text{Ecuación [7]}$$

❖ Determinación de la resistividad y salinidad del agua a partir del perfil resistivo

Si se considera que la formación está 100% saturada de agua:

$$R_w = R_{wa} = \frac{R_t}{F} \quad \text{Ecuación [8]}$$

Reemplazando F (factor de formación):

$$R_w = R_t * \phi^{m*1/a} \quad \text{Ecuación [9]}$$

Siendo:

- R_w : Resistividad del agua
- R_{wa} : Resistividad aparente del agua
- R_t : Resistividad de la formación

El cálculo de salinidad se determina a partir de la Ecuación 10, quedando su valor referido en ppm, equivalentes a NaCl (Comisión Nacional del Agua, 2007):

$$\text{Salinidad} = 10^x \quad \text{Ecuación [10]}$$

Donde:

$$X = [3.562 - \log (R_w - 0.0123)] / 0.955$$

Resolución de los perfiles

Cabe destacar que a la hora de interpretar perfiles de pozo, es necesario tener en cuenta la resolución vertical y la profundidad de investigación que puede alcanzar cada uno de estos. En la Fig. 15 se resume el alcance de estas propiedades para distintos registros geofísicos. La resolución vertical indicará el espesor mínimo que deberá tener una capa para que la herramienta de medición pueda captar su verdadera propiedad; por ejemplo, el registro sónico no captará fielmente rasgos de menos de 60 cm de espesor. Por otro lado, la profundidad de investigación indicará el alcance que tendrá la medición, desde las paredes del pozo hacia la formación; en este caso, los registros resistivos (*induction log* y *laterolog*) son los que mayor profundidad de investigación presentan, llegando a medir rasgos que se encuentran a más de 200 cm de la herramienta. Aquellos registros que tienen una profundidad de investigación más pequeña, corren un mayor riesgo de estar influenciados por daños en las paredes del pozo.

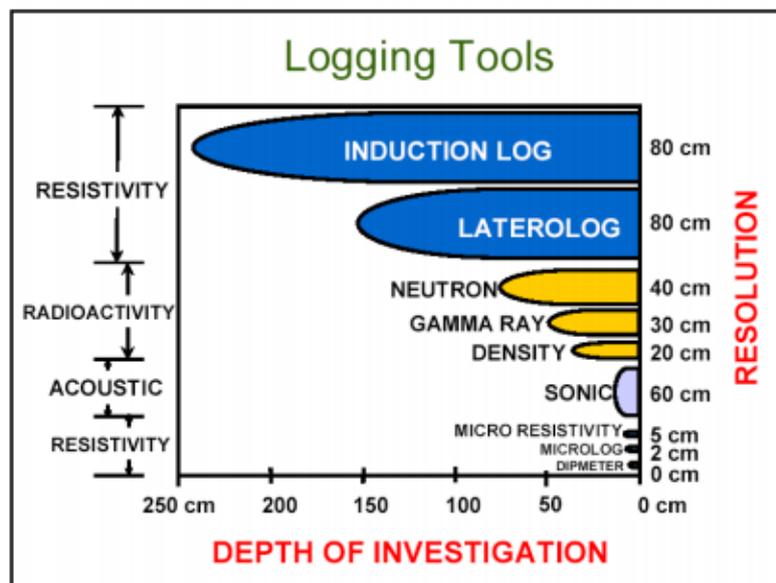


Figura 15. Resolución y profundidad de investigación de registros geofísicos. Bond *et al.*, (2020).

3.4 Sísmica de reflexión

Dentro de la sismología prospectiva, el método de Sísmica de Reflexión, es el más utilizado. Este consiste en registrar los tiempos de llegada de las ondas acústicas generadas en la superficie del terreno, reflejadas en las interfases del subsuelo y recibidas en una serie de detectores superficiales (geófonos en registración terrestre o hidrófonos en registración marina). En función de los tiempos de llegada de las ondas y de las velocidades de las rocas se puede llegar a conocer la posición de los estratos en profundidad. El método de reflexión se basa esencialmente en el Principio de Fermat, el Principio de Fresnel-Huygens y las leyes de Snell, definidas inicialmente para la óptica y aplicables para las ondas acústicas.

Principios y leyes fundamentales

Principio de Fermat

El mismo establece que el trayecto seguido por una onda al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es el mínimo. De este principio puede derivarse la ley de Snell ya que una onda, cuando viaja de un lugar a otro, siempre lo hace por el camino por donde emplea menos tiempo, incidiendo y saliendo con los ángulos dados por las leyes de Snell.

Leyes de Snell

La primera ley (ecuación 11) establece que, al incidir un frente de onda sobre una interfase, parte de la energía se refleja con un ángulo igual al de incidencia (Fig. 16). La intensidad con la que se refleje dependerá del contraste de impedancia acústica o coeficiente de reflexión que exista entre los medios que definen la interfase. La energía que no se refleja, se transmite o refracta.

$$\theta_1 = \theta_1' \quad \text{Ecuación [11]}$$

Siendo θ_1 : ángulo de incidencia y θ_1' : ángulo de reflexión.

Se sabe también que, al incidir una onda sobre una interfase, parte de la energía se transmite o refracta (Fig. 16). El ángulo de refracción puede calcularse a partir de la segunda ley de Snell (Ecuación 12)

$$\frac{\text{Sen } \theta_1}{v_1} = \frac{\text{Sen } \theta_2}{v_2} \quad \text{Ecuación [12]}$$

Siendo θ_1 y θ_2 los ángulos de reflexión y refracción respectivamente, y v_1 y v_2 las velocidades del medio superior e inferior respectivamente.

Un caso particular de la segunda Ley de Snell ocurre cuando la velocidad del medio subyacente es mayor a la del medio suprayacente. Existe un ángulo de incidencia, denominado ángulo crítico, para el cual el rayo se refleja en su totalidad en la interfase, siendo el ángulo de refracción igual a 90° . Esta onda viaja por la interfase entre los dos medios y lo hace con la velocidad del medio subyacente, de acuerdo con el principio de Fermat.

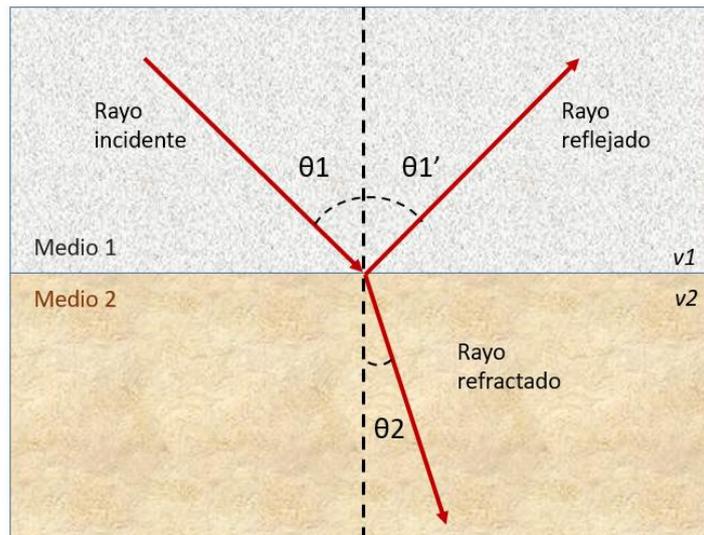


Figura 16. Primera y segunda ley de Snell

Principio de Fresnel-Huygens

Este principio afirma que todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda del que proceden (Fig. 17). Dado un frente de onda en un instante de tiempo dado, cada punto en el frente de onda emite una ondícula esférica. Las ondas están en fase con el frente de onda original y se propagan hacia afuera con la misma velocidad. Las ondículas interfieren constructivamente y su envoltura forma un nuevo frente de onda (Robinson y Clark, 2006).

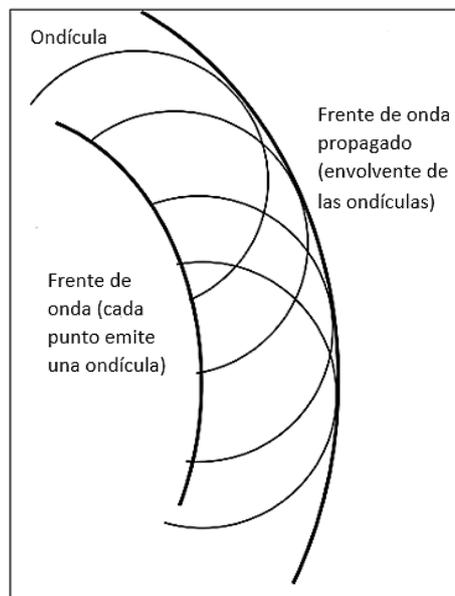


Figura 17. Principio de Fresnel-Huygens. Modificado y traducido de Robinson y Clark (2006).

Impedancia acústica

Se define como impedancia acústica (ecuación 13) a la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este. La misma está dada por la densidad y velocidad del medio; estos parámetros dependen a su vez de la porosidad, litología, compactación, contenido de fluidos, etc.

$$Z = V \times \rho \quad \text{Ecuación [13]}$$

Siendo:

- Z : impedancia acústica
- V : velocidad
- ρ : densidad

La magnitud del contraste de impedancias entre las rocas se denomina Coeficiente de Reflexión (R), el cual expresa la cantidad de energía reflejada en una interfase (Ecuación 14).

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Ecuación [14]}$$

Siendo Z_1 : impedancia acústica del medio suprayacente; Z_2 : impedancia acústica del medio subyacente.

Diseño y Adquisición

El éxito de un proyecto depende en gran medida de una correcta evaluación de las características del área, previo al diseño de adquisición del proyecto sísmico. Un correcto diseño consiste en distribuir geoméricamente de manera apropiada las líneas fuente y las líneas receptoras, para que el resultado a obtener refleje lo más efectivamente posible las características estructurales y estratigráficas de interés. Para esto se tiene en cuenta, además de las características de subsuelo que se quieren registrar y los objetivos del relevamiento sísmico, las características topográficas de la zona y los posibles problemas operativos.

El equipo necesario para la registración sísmica consta esencialmente de tres sistemas, además de la fuente de energía:

- Sistema de receptores (geófonos): Su función es transformar en un pulso eléctrico la componente vertical del movimiento del suelo.
- Sistema de transmisión (cables, fibra óptica, telemetría): El mismo lleva la información recibida en los geófonos hasta el equipo de registración.
- Sistema de registración o sismógrafo: codifica y almacena la información, además de coordinar las tareas de registración.

La etapa de adquisición finaliza con el grabado de los datos en un medio magnético con la documentación que contenga todos los detalles de la registración.

Procesamiento

El procesamiento de los datos adquiridos en el campo consiste en la aplicación de una serie de algoritmos matemáticos para el ordenamiento, corrección y aplicación de parámetros, con la finalidad de minimizar los eventos sísmicos no deseados (ruidos) y obtener un dato sísmico de calidad que tenga el mayor espectro de frecuencias posible y el mejor enfoque para facilitar la interpretación.

Las principales etapas del procesamiento que deben aplicarse corresponden a:

- Correcciones estáticas: Tienen como objetivo eliminar la influencia de las variaciones topográficas y la influencia de la capa meteorizada superficial, estableciendo un plano horizontal de referencia (nuevo cero de los tiempos sísmicos).
- Correcciones dinámicas y apilamiento o suma: Las correcciones dinámicas tienen como objetivo horizontalizar las hipérbolas de reflexión y colocar en fase las distintas reflexiones que provienen del mismo punto común profundo, con el objetivo de sumarlas en fase. Esta técnica tiene por objetivo sumar varios datos provenientes del mismo punto común profundo para realzar la señal y minimizar el ruido aleatorio presente en los registros.
- Migración: Esta etapa del procesamiento es de suma importancia ya que mediante una serie de algoritmos matemáticos se logra llevar los puntos reflejados en el subsuelo a su verdadera posición, lo cual es esencial principalmente cuando existen horizontes buzantes. Además, colapsa las difracciones generadas por puntos brillantes.

Interpretación

Correlación pozos- sísmica

La correlación o calibración de pozos-sísmica, comúnmente llamada “atado de pozos”, consiste en vincular los datos de pozo que están en escala de profundidad (metros), con los datos sísmicos, en escala de tiempo (milisegundos). Al realizar la misma se obtiene una ley de velocidad de pozo, la cual se representa en un gráfico tiempo-profundidad (Fig. 18) y representa la relación que existe entre la profundidad de las rocas y el tiempo medido.

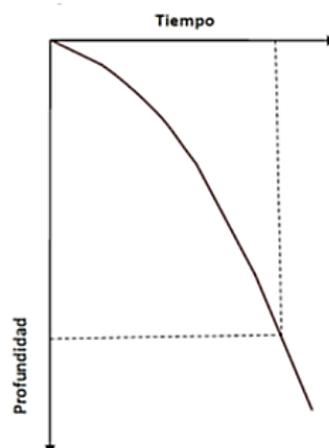


Figura 18. Ley de velocidad. En el eje de abscisas se representa el tiempo doble de recorrido de las ondas sísmicas, de izquierda a derecha. En el eje de ordenadas se representa la profundidad en el pozo.

Existen tres métodos mediante los cuales se puede realizar esta tarea, los cuales varían tanto en costo de ejecución como en precisión en la vinculación de los datos.

- **Integración del Perfil Sónico:** A partir de este, la velocidad de las rocas puede calcularse siguiendo la relación: $\Delta t = l/v$. Se puede obtener el Tiempo de Tránsito Integrado (TTI), el cual permite relacionar la profundidad en el pozo con el tiempo de la sísmica. Teniendo la información del perfil sónico y el perfil de densidad, se puede establecer un perfil de impedancias acústicas, del cual se pueden extraer los coeficientes de reflexión (Ecuaciones 13 y 14). Estos últimos se convolucionan con una ondícula extraída del dato sísmico y se genera un sismograma sintético. El sismograma sintético, es una traza sísmica sintética (es decir creada, no registrada) que debe ajustarse al dato sísmico (registrado) en la posición del pozo. Si se logra un buen ajuste se podrán identificar los reflectores que se corresponden con los niveles geológicos reconocidos en el pozo. Este es el método menos costoso, ya que se suelen utilizar los registros que se realizan en pozo, siendo menos preciso (Fig. 19).
- **Ley de Velocidad (*Check Shots*):** El método consiste en medir el tiempo que tarda un pulso sísmico generado en superficie (con una fuente de energía similar al utilizado en la registración de la sísmica de reflexión) y se propaga por la roca hasta ser detectado por receptores colocados estratégicamente en el pozo. Como la trayectoria de los rayos es inclinada por el apartamiento de la fuente, los tiempos deben verticalizarse. Este método permite obtener, además de la velocidad promedio, la velocidad interválica de las capas. Estos datos generan una ley de velocidad, pero también se utilizan para calibrar el sismograma sintético, debido a que la curva tiempo-profundidad obtenida con la prueba de velocidad normalmente tiene una diferencia (deriva o *Drift* = Tiempo sísmico – TTI) con la curva tiempo-profundidad obtenida a partir del perfil sónico, la cual se debe a la diferente forma de registración de ambos métodos. El producto final de la prueba de velocidad junto con la integración del perfil sónico es un sismograma sintético corregido.
- **Perfil Sísmico Vertical (VSP):** Éste se registra de manera análoga al *Check Shot*, con la diferencia de que los receptores ubicados en el pozo se colocan de forma equidistante (aproximadamente 15-30 m). El VSP utiliza la onda directa y también las ondas reflejadas, que permiten obtener datos por debajo de la profundidad del pozo. El tiempo total de ida y vuelta para cada reflexión se obtiene de sumar los tiempos de las ondas directas y el de las reflejadas, para cada posición. Luego de procesado, el VSP obtiene como resultado final una traza suma que representa, en ese intervalo, la respuesta sísmica de la columna sedimentaria en la posición del pozo. Con esta técnica se puede correlacionar con precisión cada rasgo de la traza sísmica del VSP con la columna sedimentaria atravesada por el pozo, y al mismo tiempo con la información sísmica de superficie. Este método es el más costoso pero más preciso de los tres.

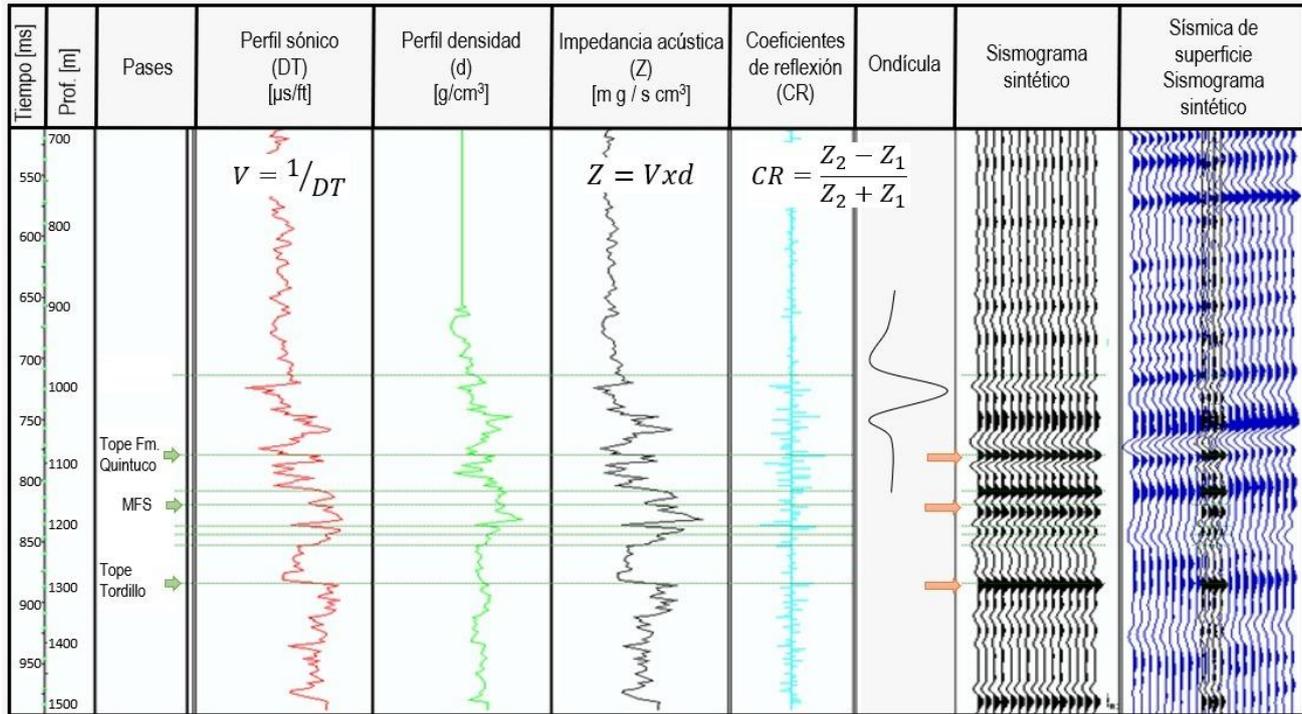


Figura 19. Construcción de un sismograma sintético.

Resolución Sísmica

Al momento de interpretar es importante tener claro cuál es la resolución que tenemos con este método de prospección. La resolución es la capacidad de separar dos rasgos que están muy cerca, es decir, cuál es el menor detalle que podrá ser “visto” por la sísmica. El poder de resolución del dato sísmico se mide en términos de la longitud de onda (λ), la cual está en relación con la velocidad y frecuencia predominante del dato sísmico (Ecuación 15). A menor λ , mejor será la resolución. La velocidad sísmica promedio aumenta con la profundidad, porque las rocas son más viejas y están más compactadas. La frecuencia predominante decrece con la profundidad porque las altas frecuencias de la señal sísmica son absorbidas o atenuadas a medida que avanzan por la corteza terrestre. El resultado es que la longitud de onda aumenta significativamente con la profundidad, empeorando la resolución vertical y lateral (Fig. 20).

$$\lambda = v / F$$

Ecuación [15]

Siendo

- λ : longitud de onda
- v : velocidad
- F : frecuencia

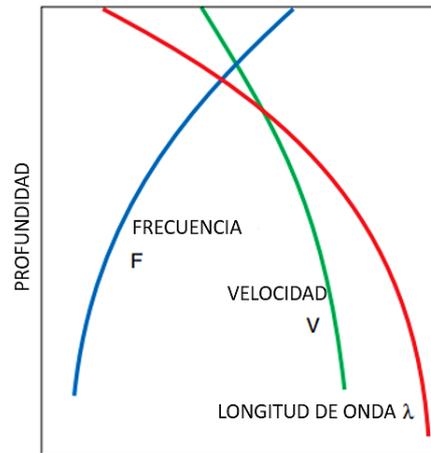


Figura 20: Longitud de onda, velocidad y frecuencia en función de la profundidad. La longitud de onda aumenta significativamente con la profundidad, empobreciendo la resolución sísmica. Brown (2004).

Resolución Vertical

La misma expresa 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. Para espesores menores a este, la amplitud de la reflexión no corresponde a la amplitud real de las interfases, ya que ocurre interferencia entre la reflexión del tope y de la base (Fig. 21).

Existen distintos criterios para calcular el valor de la resolución vertical (*RV*). En este proyecto se utilizó el criterio de Rayleigh, el cual establece que el límite de resolución es de un cuarto de la longitud de onda dominante, o medio periodo (Ecuación 16).

$$RV = \lambda/4 = v / 4F = T/2 \quad \text{Ecuación [16]}$$

Siendo *RV*: resolución vertical; λ : longitud de onda; *v*: velocidad; *F*: frecuencia; *T*: periodo.

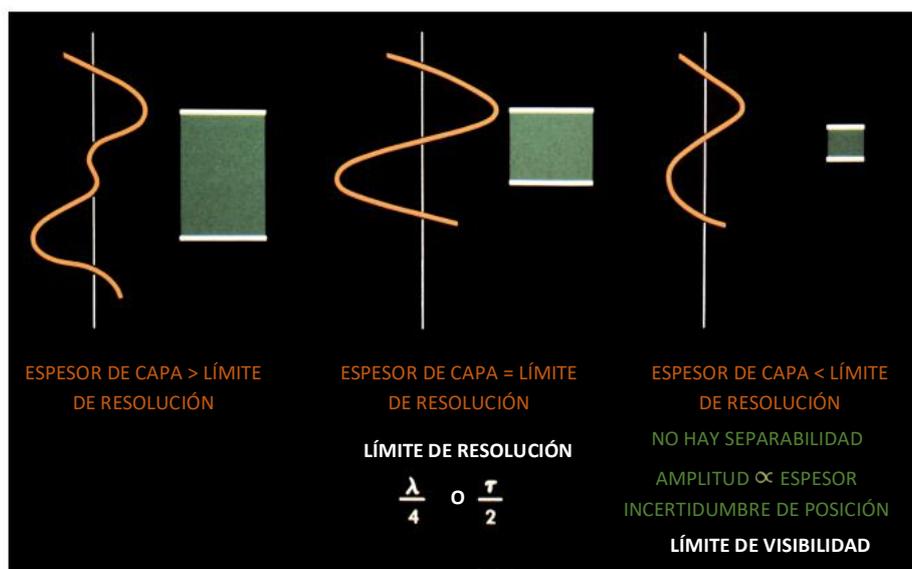


Figura 21. La resolución de las reflexiones al tope y base de una capa depende de la interacción de las ondículas consecutivas. Brown (2004).

Resolución horizontal

Está directamente relacionada con el radio de Fresnel y corresponde a la mínima separación lateral de rasgos que podrán ser discriminados. Esta resolución suele ser optimizada con una correcta aplicación de migración durante el procesamiento de los datos, de modo que su valor se acerca a la mitad del valor de la resolución vertical (Ecuación 17).

$$\text{Resolución lateral post – migración} = \lambda/2 \quad \text{Ecuación [17]}$$

3.5 Origen de los datos y programa para su análisis

Los datos de pozos y de sísmica 3D utilizados en este trabajo fueron otorgados por la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén.

Tanto para el análisis de perfiles eléctricos de pozo como para la interpretación del volumen sísmico, se utilizó el programa *Decision Space Geosciences 10* de Landmark, Halliburton, disponible por convenio con la empresa Halliburton, en el “Laboratorio de aplicaciones de Geociencias”. Dentro de este programa se utilizaron los módulos: *Well Seismic Fusion*, para la correlación sísmica/pozo; *Interpretation – View Editors/ Horizon/ Fault*, para la interpretación sísmica y visualización de registros de pozos; *Seismic Attributes*, para la visualización de atributos sísmicos; *Interpretation – Well Pick* para la correlación de pases entre pozos; *Log Calculator* para la generación de curvas a partir de perfiles preexistentes; *Velocity Modeling*, para la confección de modelos de velocidad; *Time Depth*, para la conversión de profundidad en tiempo a metros; *Framework*, para la confección de mapas.

4. Desarrollo / Aplicación

4.1 Información de subsuelo utilizada

Selección de pozos

Sobre un total de 41 pozos, se realizó un análisis a la información de cada pozo disponible, con el fin de seleccionar aquellos pozos que serían de utilidad para el presente trabajo. Se consideraron los pozos con información por arriba de los 1000 mbbp. Dentro de estos, se discriminó aquellos que tenían disponible control geológico, aquellos que tenían perfil sísmico para realizar la calibración pozo-sísmica y por último aquellos que tenían perfiles de GR, DT, Resistivos, Densidad y SP, para la correlación y análisis de potenciales acuíferos. En la Tabla 1 se detallan los pozos disponibles y en la Fig. 22 se muestra la ubicación de los pozos utilizados en el presente trabajo.

POZO	Control geológico (desde)	Perfiles (.LAS) (desde)	DT (desde)	DEN. (desde)	GR (desde)	SP (desde)	RESIST. (desde)	CALI. (desde)	Coordenadas POSGAR 1994 ARG Zona 2			Prof. pozo (mbbp)
									X	Y	Z	
ADC.x-1002	1795	933	933	1800	933	933	933	933	2555597,80	5699138,10	343,5	2686
ADC.x-1017	1005	941	954	948	941	948	965	948	2555703,20	5698390,00	295,4	2600
ADC.x-3	2229	950	1798	1750	1750	950	950	1750	2549414,00		441,0	2821
ADC.x-8	1950	85	247-1000/ 1800-2900				105	85	2543927,00	5705347,00	472,0	2903
ADC.a-8	2150	105	130-900/ 1700-2300	1850	1850	105	105		2548250,00	5704050,00	412,1	2900
ADC-1004	2304	739	739	739	739	739	739	739	2551194,55	5699241,00	401,9	4151
ADC-1011	61	799	799	811	799	811	811	811	2546089,00	5700031,80	511,4	3787
ADC-1016	26	24	830		23	23	23	23	2547690,00	5698747,00	513,4	4320
ADC-5	2448	95	1720			95	95	1745	2548409,00	5704099,00	412,1	2700
ADCN.x-1001		989		989	989		989	989	2559608,43	5706186,35	391,2	3200
Ce.x-1114	1600	1700				144			2562173,41	5695874,10	271,0	2461
Ce.xp-1116	1363	365	390	1492	365	390	1500		2565529,81	5690967,00	277,0	5015
Ce.a-037	200	105				105	105		2558537,60	5697125,70	278,4	2550
Ce-100		110				110			2563867,17	5694693,16	298,0	2360
CoO.x-1	1870	60	60		60	60	60	60	2558695,66	5702010,26	379,0	2832
LI-1001	50	630	281	630	281	281	281	281	2554211,47	5690598,38	279,5	1991
PS.x-2	1138	871	1667				871	1649	2538937,06	5696094,48	598,0	2527
PS.x-4	1770	896	1696			896	896		2541402,84	5696488,35	529,0	2693
PS.x-5	990	95	1720			95	95	1745	2538924,06	5697042,36	557,0	2629
RL.x-1002	500	245		695	245	245	245	695	2558751,90	5685519,63	279,0	1132
RL.x-2	820	146	656			150	146	146	2562585,95	5687221,77	279,7	1798
RL.x-2001	65	19	238	238	19	214	238	238	2553133,51	5687591,10	326,2	630
Sa.a-22	1820	670				670	670		2544038,19	5694663,25	471,0	2301
Sa-0002	90	500	1500	-	-	45	45	1500	2559022,75	5691651,1	314,7	2248
Sa-1004	1540	160		600	160	160	160/600		2546760,00	5692649,58	377,0	2016
Sa-1021		132		1474	132	149	153		2560875,76	5690599,48	284,7	1900
Sa-1043	1697	43	1491	1494	10	10	10	1500	2549169,89	5694356,28	334,1	3614
Sa-1069	50	598		600	600	768	600	600	2564436,78	5691240,59	284,0	2555
Sa-1073	1765	689			689	689	684	cortado	2554651,82	5693960,45	273,6	3772
Sa-1097	250	212	212	874 se corta	212	213	231	212	2555746,12	5691107,5	292,2	1861
Sa-1122		473		1499	473	473	473	473	2542772,38	5691724,48	427,5	2000
Sa-1125	208	205	181	600	181	180	181	181	2556614,00	5691167,00	329,1	1400
Sa-1160		483	1500		483	497	499	489	2545005,67	5691436,76	429,5	1950
Sa-1167		80		1575	80		80	80	2547536,33	5694115,60	360,5	2000
Sa-1194		635		635	635	635	635		2543115,17	5694484,52	473,0	2212
Sa-1225		990		990	990	990	990	990	2562445,91	5692651,52	330,5	3000
Sa-1238		980		980	980	980	980	980	2560267,00	5693785,00	268,0	3500
Sa-21	1939	60		1500		60	60	1500	2553847,38	5694759,03	471,0	1700
SC.x-1011	200	200	200	200	200	200	200	200	2549314,36	5690986,64	332,80	1650
SN- 1001		724	1952	1278	724	724	724	1300	2551259,00	5695259,50	309,8	3696
SN.x-3	1197	108	1850			108	108		2544411,93	5693336,93	409,4	2200

Tabla 1. Totalidad de pozos otorgados por la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén para la realización de este trabajo. Aquellos sombreados en gris son los pozos utilizados en el presente estudio.

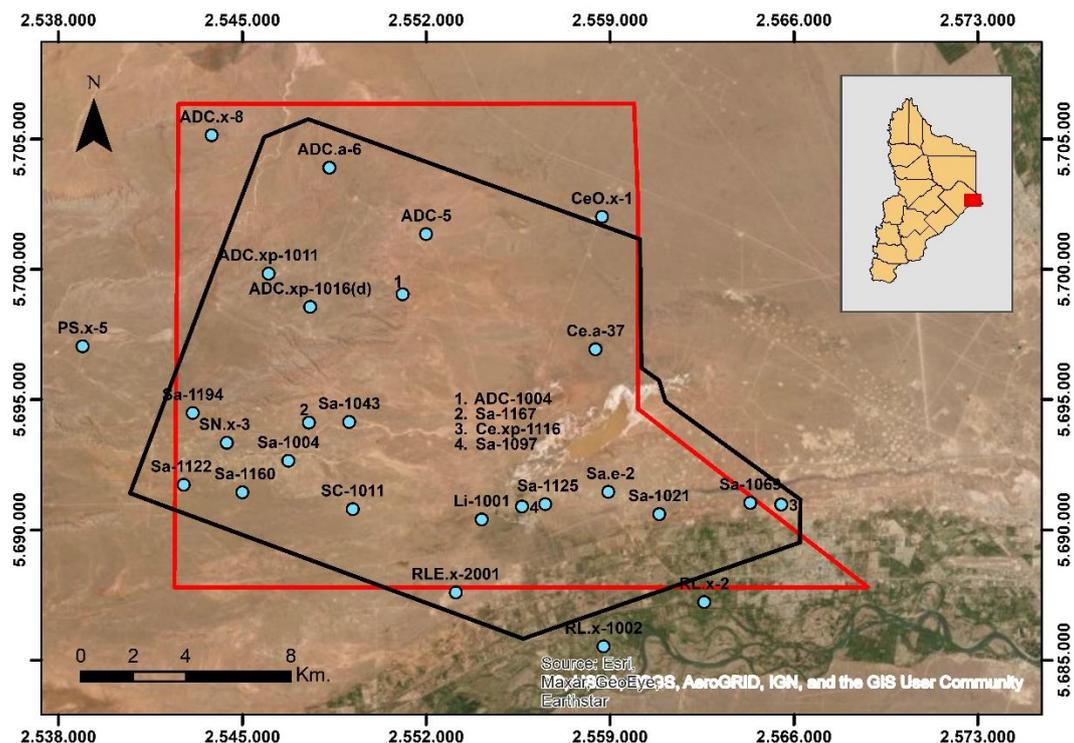


Figura 22. Ubicación del total de pozos utilizados en el presente trabajo. En rojo: área Agua del Cajón; En negro: Proyecto sísmico Agua del Cajón 3D. Datos para la elaboración del mapa obtenidos de la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén.

Sísmica

Se trabajó con el proyecto sísmico Agua del Cajón 3-D, realizado por la compañía Western Atlas International, para CAPEX S.A. El proyecto cubre una superficie de aproximadamente 305 km². Los parámetros utilizados para su diseño de registración se describen en el Tabla 2.

Tendido	Simétrico	Total de puntos vibrados	33566
Total líneas receptoras	64	Total de líneas fuente	70
Total estaciones receptoras	24339	Total de puntos fuente	17475
Intervalo entre líneas receptoras	250m	Intervalo de líneas fuente	350m
Intervalo entre puntos receptores	50m	Intervalo entre puntos fuente	50m
Azimuth líneas receptoras	110 grados	Nº de puntos fuente	33566
Nº canales tendido completo	490	Azimuth líneas emisoras	20 grados
Fold	35	Offset Max	5338m
Tamaño bin	25X25	Offset Min	12m

Tabla 2: Parámetros del diseño de registración sísmica 3D. Extraído del Reporte Final de Operaciones.

Los parámetros correspondientes a la adquisición del proyecto Agua del Cajón 3D se detallan en las tablas 3 y 4. En las figuras 23 y 24 se muestra un esquema de los arreglos de fuentes y receptores; en la Fig. 25 se muestra un mapa con la distribución de fuentes y receptores.

Parámetros de emisión

Tipo de arreglo	Lineal simétrico
Centro del arreglo	Estaca
N de vibradores	2
Arreglo de emisión	2 vibradores cada 15 metros
N de barridos	2
Longitud del barrido	12 segs.
Tiempo de escucha	5 segs.
Frecuencia	5-100 Hz
Correlación	Fase Cero después de Stack
Patrón de vibración	Fuentes duales “ping-pong”
Dinamita	3 pozos en línea, distanciados 2m, profundidad 1.5 m., carga 150 gr por pozo.

Tabla 3. Parámetros de emisión. Extraído del Reporte Final de Operaciones.

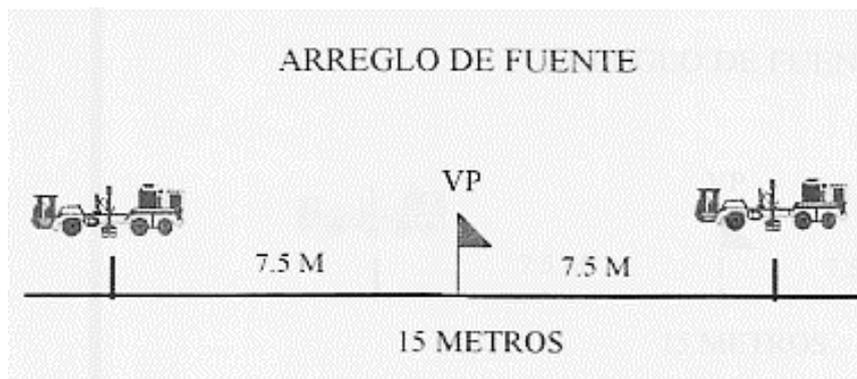


Figura 23. Arreglo de fuente. Extraído del Reporte Final de operaciones.

Parámetros de recepción

Tipo de arreglo	Lineal
Cantidad de geófonos por grupo	12
Longitud del arreglo	27.5 m

Tabla 4. Parámetros de recepción. Extraído del Reporte Final de Operaciones.

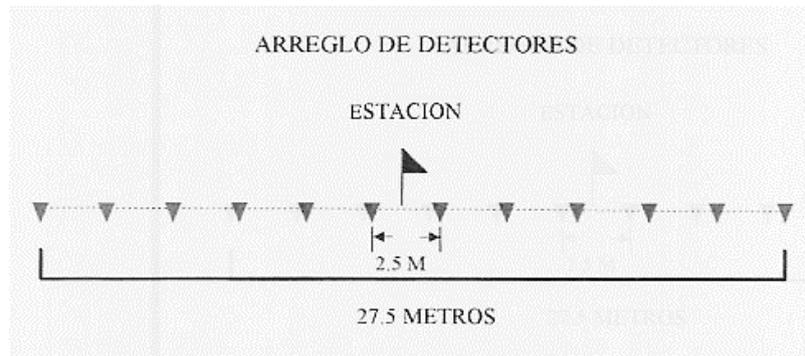


Figura 24. Arreglo de detectores. Extraído del Reporte Final de operaciones.

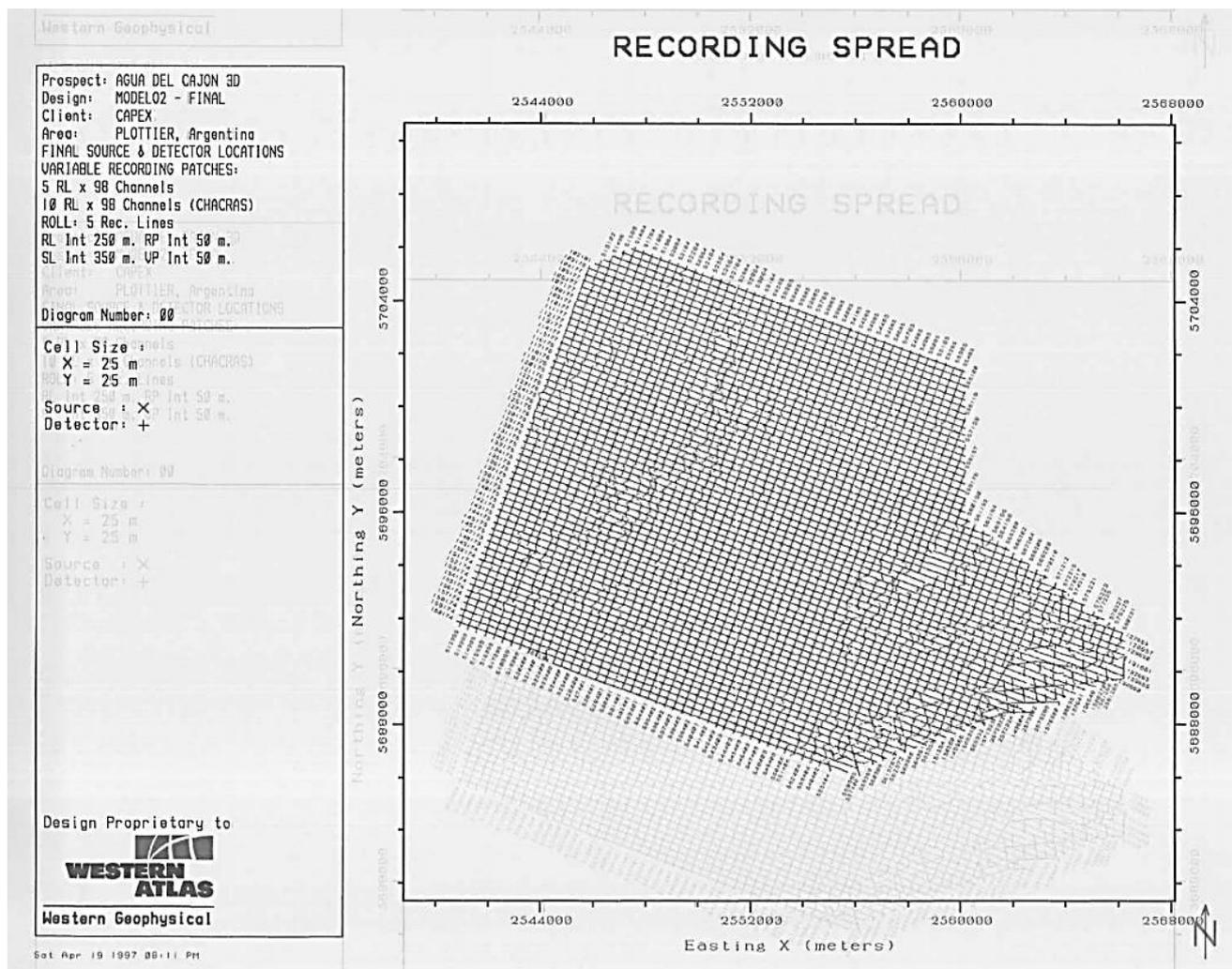


Figura 25: Mapa final de fuentes y receptores. Extraído del Reporte Final de operaciones.

Como en toda registración sísmica, se presentaron distintos problemas. La mayoría de estos fueron sorteados realizando adaptaciones. La topografía accidentada en la zona de bardas requirió la apertura de desvíos para los vibradores. En la zona de chacras se adaptó el diseño para evitar el doble paso de los vibradores por las vías y las chacras. La laguna El Salitral, rasgo que abarca 5 km² dentro del área,

generó 58 *skips* o saltos en la registración y 97 puntos debieron ser registrados usando como fuente dinamita. Otros factores inevitables varios que generaron ruido ambiental fueron: líneas de alta tensión, la Planta de CAPEX S.A., el cruce con la ruta provincial N° 2, gasoductos y el yacimiento y sus baterías en funcionamiento. El viento solo resultó importante en pocas oportunidades.

Se detalla a continuación la secuencia de procesamiento del dato sísmico Agua del Cajón 3D (Reporte final de operaciones).

1. SEG-D a formato OMEGA
2. Actualización de la Geometría y las Estáticas de Campo en los Headers de las Trazas
 - Velocidad de remplazo: 2100 m/s
 - Datum de Proceso: 300m
3. Función de Ganancia Temporal
4. Deconvolución *spike* traza por traza
5. Ganancia instantánea, longitud de ventana de AGC 250 ms
6. CMP *Sort*
7. Cálculo de estáticas de Datum por CMP
8. Análisis de velocidad 3D, interpolación espacial de velocidades
9. NMO hiperbólico
10. Enmudecimiento frontal
11. Apilamiento de CMPs de las líneas seleccionadas
12. Aplicación de estáticas de datum por CMP
13. Filtro pasabanda de 8 Hz a 80 Hz
14. Deconvolución FXY (Atenuación de ruido aleatorio)
15. Ganancia RMS
16. Selección de *stacks* en línea y x-línea
17. Impresión en papel

4.2 Análisis de datos de pozos

Características litológicas a partir de datos de control geológico

Se estudiaron y resumieron las descripciones de los controles geológicos de los pozos, dividiendo el área en cuatro sectores, agrupando aquellos pozos con características similares. Se describen desde lo más somero a lo más profundo. En base a sus características litológicas se individualizaron tres secuencias. Estas corresponderían a las Formaciones Huincul, Candeleros y Rayoso/Centenario respectivamente. En los pozos del sector noroeste se describe una cuarta secuencia más somera, que podría corresponderse con la Fm. Cerro Lisandro. En la Fig. 26 se observa la ubicación de los pozos utilizados. Para esta tarea se seleccionaron aquellos pozos cuyas descripciones incluyen las formaciones de interés.

Cabe destacar que también se realizó, a partir del análisis y síntesis de los controles geológicos, una codificación de los mismos en sistema numeral, con el objetivo de poder observarlos en el programa informático utilizado. Esto mismo se realizó también con los rastros de hidrocarburos descriptos en los legajos de pozos.

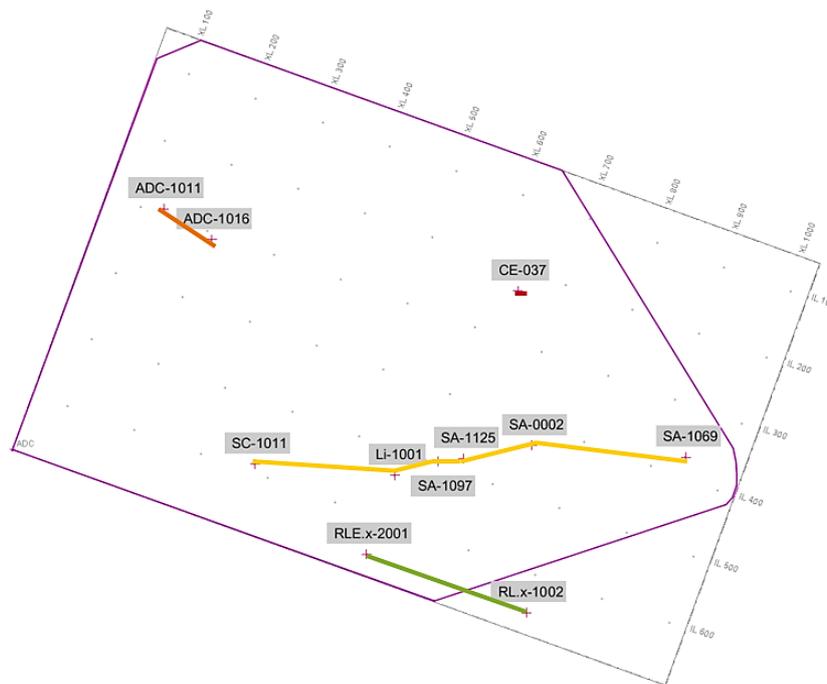


Figura 26: Ubicación de los pozos utilizados en la descripción del control geológico. Se indican con diferentes colores las transectas que unen las agrupaciones de pozos realizadas por sector y por características similares.

Sector Noroeste (Pozos ADC-1011 y ADC-1016) (Fig. 27): Los datos de control geológico comienzan a partir de los 26 mbbp.

En los primeros metros se describen areniscas de coloración castaño rojizo oscuro de granulometría fina hasta gruesas, subredondeadas a subangulosas, con regular selección, presencia de cuarzo y líticos rojizos oscuros, matriz arcillosa, por partes con cemento calcáreo y poco consolidadas. Intercalan con limoarcilitas/arcilitas castaño rojizas masivas, de aspecto terroso, en parte con inclusiones arenosas, con fractura irregular, en parte plásticas, moderadamente compactadas.

Pasados los 120 mbbp, las anteriores secuencias gradan a areniscas de coloración gris clara/anaranjada pálida en general de granulometrías gruesas llegando a ser conglomerádicas, con moderada selección, matriz arcillosa variable, ocasional cemento calcáreo, moderadas a pobremente compactadas. Estas también intercalan pero en menor medida con limoarcilitas castaño rojizas/ gris verdosas, masivas, con inclusiones finas de cuarzo, fractura irregular y poco compactas.

Por debajo de los 560 mbbp, se describen areniscas de color castaño rojizo oscuro, de granulometría fina a media, redondeadas, con selección regular a pobre, presencia de líticos rojizos y oscuros, abundante matriz arcillosa, poco consolidadas a sueltas, que intercalan con limoarcilitas también castaño rojizas, masivas, con fractura irregular, plásticas y compactas.

No hay control geológico desde los 600 hasta los casi 900 mbbp. Por debajo de los 900 mbbp, se desarrollan areniscas gris blanquecinas desde gruesas a conglomerádicas, subredondeadas a redondeadas, de regular selección, con clastos partidos, cuarzo, feldespatos y líticos verdes, escaso cemento calcáreo y poco consolidadas a sueltas, intercaladas con ocasionales niveles de limoarcilitas castaño rojizas, masivas, con fractura irregular y moderada compactación.

Sector Noreste (Pozo CE-37) (Fig. 27): Los datos de control geológico comienzan a partir de los 200 mbbp. Cabe aclarar que el registro es antiguo y la descripción no es tan detallada como en otros pozos.

Desde los 200 hasta los 380 mbbp, se describen areniscas rosadas blanquecinas, de granulometría fina a media, cuarzosa, friable que alterna con arcillas de coloración castaño clara.

No hay control entre los 380-540 mbbp. Por debajo de los 540 mbbp se describen areniscas castaño violáceas oscuras, arenosas y compactas, que intercalan con abundantes niveles de arcillas verdosas y castaño violáceas.

A partir de los 710 mbbp se desarrollan areniscas blanquecinas desde finas hasta conglomerádicas friables, con ocasionales intercalaciones de arcillas.

Sector centro sur - centro este (Pozos SC-1011, Li-1001, SA-1097, SA-1125, SA.e-2 y SA-1069) (Fig. 27): No se incluyen las profundidades ya que son variables entre pozos.

En los primeros metros se desarrollan areniscas gris claras de granulometría media hasta muy gruesa, ocasional conglomerádica, subangulosas /subredondeadas, con regular a buena selección, presencia de cuarzo, ocasional pirita aislada, en general escasa matriz arcillosa, ocasional cemento calcáreo, poco consolidadas. Intercalan con estas limoarcilitas castañas/verdosas masivas, con fractura irregular, poco compactas.

Por debajo de las anteriores se describen areniscas castaño rojizas en general de granulometrías finas/arcillosas, subangulosas/subredondeadas, con regular selección, presencia de cuarzo y líticos, matriz arcillosa en ocasiones abundante, poco consolidada. Intercalan con limoarcilitas castaño rojizas.

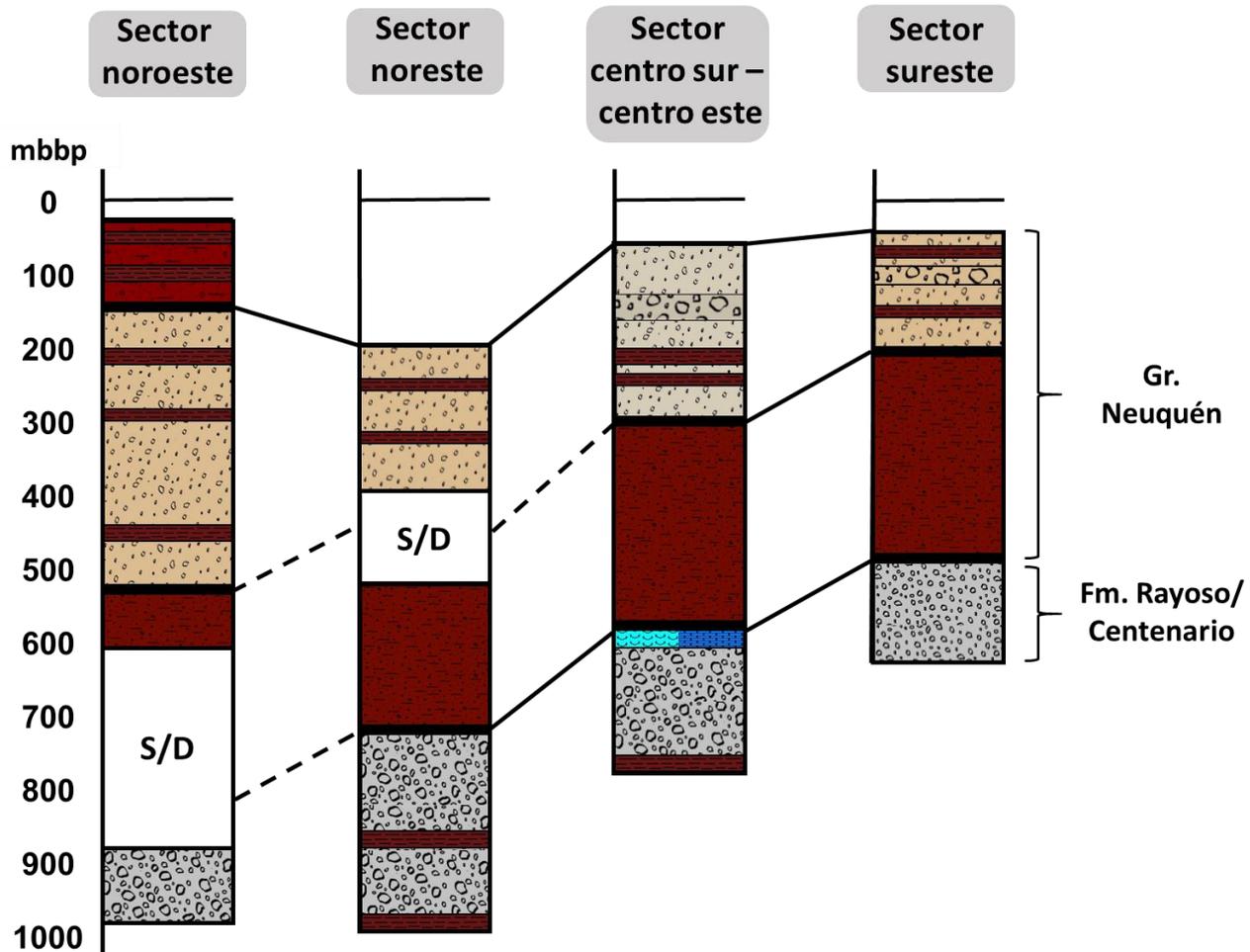
Posteriormente se describen areniscas grises claras de granulometría media hasta conglomerádica, subredondeadas a redondeadas, con regular a buena selección, presencia de ocasionales pequeños niveles de caliza al comienzo, escasa matriz arcillosa, poco consolidadas. Intercalan irregularmente con limoarcilitas.

Sector sureste (pozos RLE.x-2001 y RL.x-1002 (Fig. 27)): Los datos de control geológico comienzan a partir de los 65 mbbp.

En los primeros metros se desarrolla una intercalación de arcilitas castaño rojizas con areniscas grisáceas de granulometría fina a media, subangulosas, de moderada selección, con presencia de líticos, cuarzo, abundante matriz arcillosa blanquecina y cemento calcáreo, generalmente suelta.

Por debajo de los 200 mbbp se desarrollan areniscas castañas, de granulometría gruesa hasta muy fina, subredondeadas, con moderada selección, abundante matriz arcillosa castaña y presencia de pirita diseminada. Estas se encuentran principalmente sueltas, friables.

A partir de los 520 mbbp se desarrollan areniscas gris claras de granulometría medias, subangulosas/subredondeadas, con moderada selección, presencia de cuarzo y escasos líticos, escasa matriz y cemento calcáreo. Se encuentra suelta y friable. También tiene presencia de pirita.



REFERENCIAS

S/D	Sin datos de control geológico		Areniscas medias
	Limoarcilitas/Arcilitas masivas		Areniscas gruesas a conglomeráticas
	Areniscas finas a gruesas con matriz arcillosa		Yeso
	Areniscas muy finas a medias con abundante matriz arcillosa		Calizas
	Areniscas finas a gruesas		

Figura 27: Columnas litológicas esquemáticas para cada sector del área, basadas en información de control geológico.

Correlación de pozos a partir de perfiles eléctricos

Se realizó una correlación entre 27 pozos, teniendo en cuenta los perfiles de rayos gamma, resistividad, sónico, densidad y SP. También se complementó la determinación de límites de formaciones con la información disponible de controles geológicos.

En el intervalo estudiado en el área Agua del Cajón, se han interpretado dos límites que separan tres secuencias con respuestas particulares en los perfiles geofísicos. En la tabla 5 se resumen las

características de las mismas. En la tabla del Anexo 2 se muestran las profundidades de los pases determinados en cada pozo y las correlaciones se muestran en la Fig. 28 y en el Anexo 3.

La secuencia 1 correspondería a niveles superiores de la Fm. Rayoso/Centenario, siendo el Límite 1 la base del Gr. Neuquén. Las secuencias 2 y 3 están conformadas, por ende, por rocas pertenecientes al Gr. Neuquén. Se sabe que la distinción formacional dentro de este grupo no es tarea sencilla, incluso en afloramientos, motivo por el cual no se precisarán límites exactos. Sí se puede inferir, apoyándose en el control geológico, que la secuencia 2 incluiría enteramente a la Fm Candeleros y probablemente parte de la Fm. Huincul, mientras que la secuencia 3 incluiría el resto de la Fm. Huincul y la Fm. Cerro Lisandro/Fm. Portezuelo. El Límite 2, por lo tanto, sería un límite interno dentro del Gr. Neuquén.

A fines prácticos del presente trabajo, se escogió una nomenclatura informal para cada límite y secuencia. Las secuencias 1, 2 y 3 se llamaron Fm. Rayoso/ Fm. Centenario, Gr. Neuquén basal y Gr. Neuquén superior respectivamente; los límites 1 y 2 se nombraron Base Gr. Neuquén y Tope Gr. Neuquén basal.

Observaciones:

- Se esperaba que la Fm. Candeleros, al destacarse habitualmente por su presencia de abundante matriz fangosa, presentase altos valores de GR. Sin embargo, esto no sucede así. Una posible justificación a este fenómeno podría explicarse si efectivamente, como mencionan Di Paola y Marchese (1970), la fracción pelítica está formada principalmente por montmorillonita, la cual no arroja altos valores de GR por su bajo (o nulo) contenido en minerales radioactivos.
- Por otro lado, tampoco se encuentra concordancia entre los altos valores de GR en los niveles superiores (secuencia 3) y su descripción en control geológico. Por ejemplo, zonas descriptas como 100% areniscas medias/gruesas poseen valores de GR > 150 (equivalente a contenidos de arcilla > 60%). Esto también podría explicarse por el tipo de arenisca presente, como lo son las areniscas con minerales como micas o feldespatos alcalinos. Estas últimas arrojan volúmenes de arcillas mayores a los reales, por presentar en su composición minerales radioactivos.

Secuencia 3: Gr. Neuquén superior	Secuencia con variaciones de alta frecuencia en todos los perfiles. General aumento en la respuesta del perfil GR respecto al Gr. Neuquén Basal. Registro SP reactivo a variaciones litológicas/ de salinidad. General aumento en la resistividad respecto al Gr. Neuquén Basal. General aumento en el DT respecto al Gr. Neuquén Basal. General disminución de densidad respecto al Gr. Neuquén Basal.	Límite 2	Tope Gr. Neuquén basal →
Secuencia 2: Gr. Neuquén basal	Valores de GR relativos bajos El registro SP tiene una respuesta nula o no apreciable General aumento de resistividad por sobre su límite basal. Respuesta constante en toda la secuencia. Registro de DT con velocidades en torno a los 80 us/ft. Densidad constante en torno a los 2.3/2.4 g/cm ³	Límite 1	Base Gr. Neuquén →
Secuencia 1: Fm. Rayoso/ Fm. Centenario	Aumento en la respuesta del perfil de GR respecto a la secuencia suprayacente. El registro SP responde marcando cambios entre capas, posiblemente asociado a un mayor o menor contenido de finos. General disminución en la resistividad respecto al Gr. Neuquén basal. Cabe destacar en varios pozos la presencia de un paquete de espesor variable con mayor resistividad que su entorno. No hay suficientes perfiles sínicos para realizar una buena comparación. En ocasiones se observan valores de DT relativos altos.		

Tabla 5. Comportamientos observados en los perfiles eléctricos de cada secuencia interpretada.

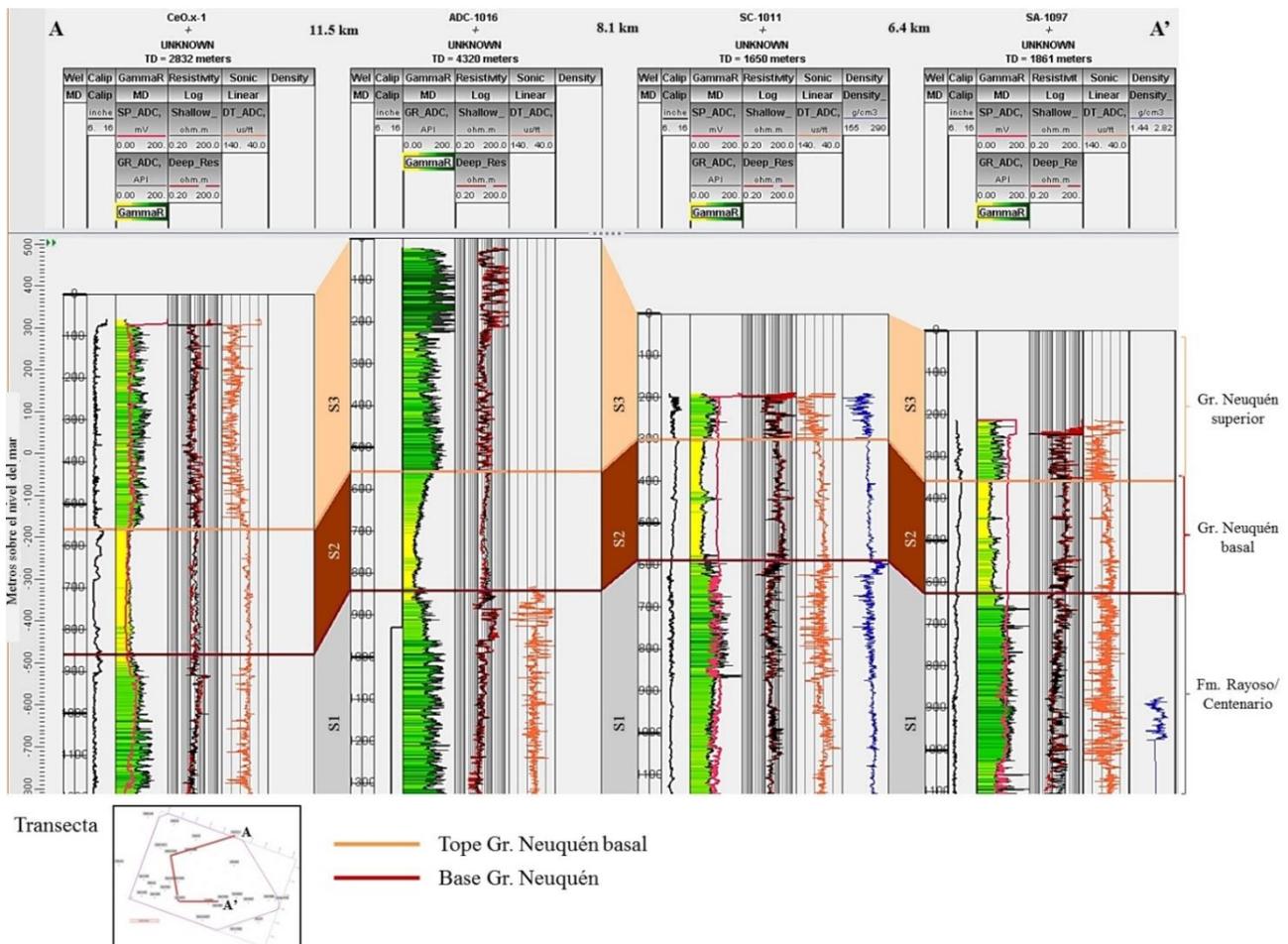


Figura 28. Secuencias interpretadas y correlacionadas en el intervalo de interés en el área Agua del Cajón. A modo de ejemplo se muestran 4 pozos. En las pistas se observa, de izquierda a derecha: profundidad en el pozo en metros (pista 1), registro caliper (pista 2), registro de GR y SP (pista 3), registro de resistividad (pista 4), registro sínico (pista 5) y registro de densidad (pista 6).

Propiedades obtenidas a partir de registros eléctricos

Volumen de arcillas

A partir de los perfiles de GR disponibles, se generaron curvas de contenido de arcilla siguiendo la ecuación 4. El mismo se representa con valores de 0 a 1 en la segunda pista de los perfiles observados en la Fig. 29.

Cabe mencionar que dicho perfil fue posteriormente descartado en la determinación de niveles acuíferos; en su lugar, se primaron las descripciones analizadas de los controles geológicos. Como se mencionó en el apartado 4.2 “Análisis de datos de pozos - Correlación de pozos a partir de perfiles eléctricos – Observaciones”, no se encontró concordancia entre los valores arrojados por el registro de GR y la descripción litológica del control geológico.

Porosidad

A partir de la ecuación 7 se calculó la porosidad en un total de 11 pozos, los cuales tenían disponible el perfil sónico. Siguiendo los criterios aplicados por Alonso (2015), se utilizaron los siguientes valores en las distintas variables:

- Tiempo de tránsito del fluido (Δt_f): 189 us/ft
- Tiempo de tránsito de la matriz (Δt_{ma}): 54us/ft
- Factor de corrección empírico (C_p): 1,5

La curva de porosidad (PHI_DT) se representa con valores de 0 a 1 en la tercera pista de los perfiles observados en la Fig. 29.

Para los restantes pozos que no disponían del registro sónico, se utilizaron valores promedio basados en los pozos en los que sí se pudo calcular la porosidad a partir este registro. Se determinaron dos valores dado que, como se puede observar en la Fig. 29, los perfiles muestran dos tramos bien definidos con porosidades marcadamente diferentes, por lo que se calcularon promedios aritméticos para cada uno de estos tramos, y se utilizaron estos valores en los pozos en los que no se pudo calcular la curva de porosidad. Para el tramo superior se determinó un valor de porosidad promedio de 0.27 o 27% y para el tramo inferior un valor de 0.16 o 16%.

Salinidad

Siguiendo las ecuaciones 9 y 10 se calcularon la R_{wa} y salinidad en todos aquellos pozos con perfil de resistividad disponible (un total de 26 pozos). Se utilizaron los valores de 1 y 2 para los coeficientes a y m respectivamente.

La curva de salinidad (STD) se representa con valores de 0 a 10.000 ppm en la cuarta pista de los perfiles observados en la Fig. 29.

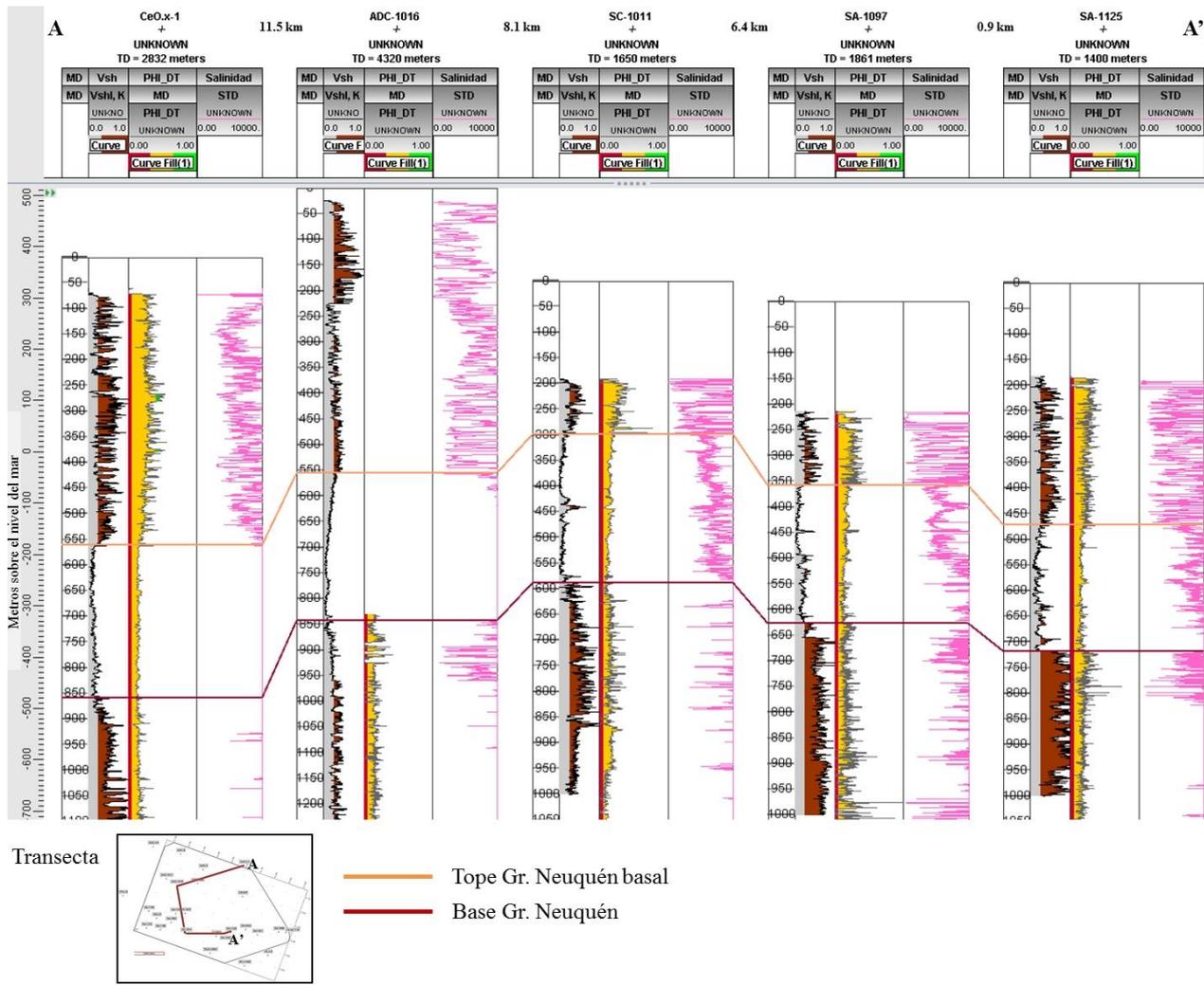


Figura 29. Perfiles de propiedades hidrogeológicas determinadas a partir de perfiles eléctricos. De izquierda a derecha se representa: profundidad en el pozo (MD, pista 1), volumen de arcillas (Vsh, pista 2), porosidad total (PHI_DT, pista 3) y salinidad (STD, pista 4). El perfil de Vsh tiene una escala de color que colorea en marrón aquellos valores mayores a 25%. El perfil de porosidad colorea de rojo los valores menores a 0.05, de amarillo los valores de 0.05 a 0.4 y verde los mayores a 0.4.

Determinación de niveles de interés hidrogeológico

Se establecieron 3 categorías de niveles acuíferos (AC1, AC2 y AC3). En primer lugar, en la categoría AC1 se discrimina aquellos niveles con agua dulce que deben ser protegidos estrictamente dada Ley Provincial No 2267², sean o no explotables. En segundo lugar, en la categoría AC2 se discriminan niveles que además de contener agua dulce, poseen condiciones favorables³ para una potencial explotación. Por último, se propone una tercera categoría AC3, en la cual su eventual explotación implicaría un pequeño tratamiento de desalinización. En la tabla 6 se detallan los parámetros englobados en cada una.

² La Ley Provincial No 2267, Decreto No 4468, en referencia a las normas ambientales a cumplir en la etapa de perforación y explotación, establece que se considera como horizonte acuífero de baja salinidad a aquellos que posean un máximo de 4000 microhmios por centímetro o 3000 ppm de sales totales.

³ En el Anexo 4 se muestra una tabla de clasificación geológica e hidrogeológica según Custodio y Llamas, (1983).

	AC 1	AC 2	AC 3
	Niveles a proteger reglamentarios	Buenos niveles acuíferos	Potenciales acuíferos tratables
Cualidades	Salinidad < 3000 ppm	Salinidad < 3000 ppm 5% < ϕ < 40% Areniscas y conglomerados	Salinidad < 5000 ppm

Tabla 6. Parámetros establecidos para cada categoría de niveles acuíferos.

4.3 Análisis de datos sísmicos

Correlación pozos-sísmica

Para la correlación sísmica/pozo se utilizó el método del perfil sónico, ya que no se contaba con datos de *check shots* ni de VSP. Dentro de la totalidad de pozos analizados para el trabajo, 25 de ellos tenían disponible el perfil sónico. De estos 25 se seleccionaron 9 para realizar la correlación con el dato sísmico, ya que estos contaban con dicho perfil en la profundidad de interés. Cabe destacar que esta tarea se vio dificultada en aquellos pozos que atraviesan la falla, debido al ruido generado en la sísmica. En la Fig. 30 se muestra la ubicación de los pozos utilizados para la calibración pozo-sísmica, en las figuras 31 y 32 se muestran secciones sísmicas que incluyen algunos de estos pozos correlacionados, y en Anexo 5 se muestran los datos de correlación de los mismos.

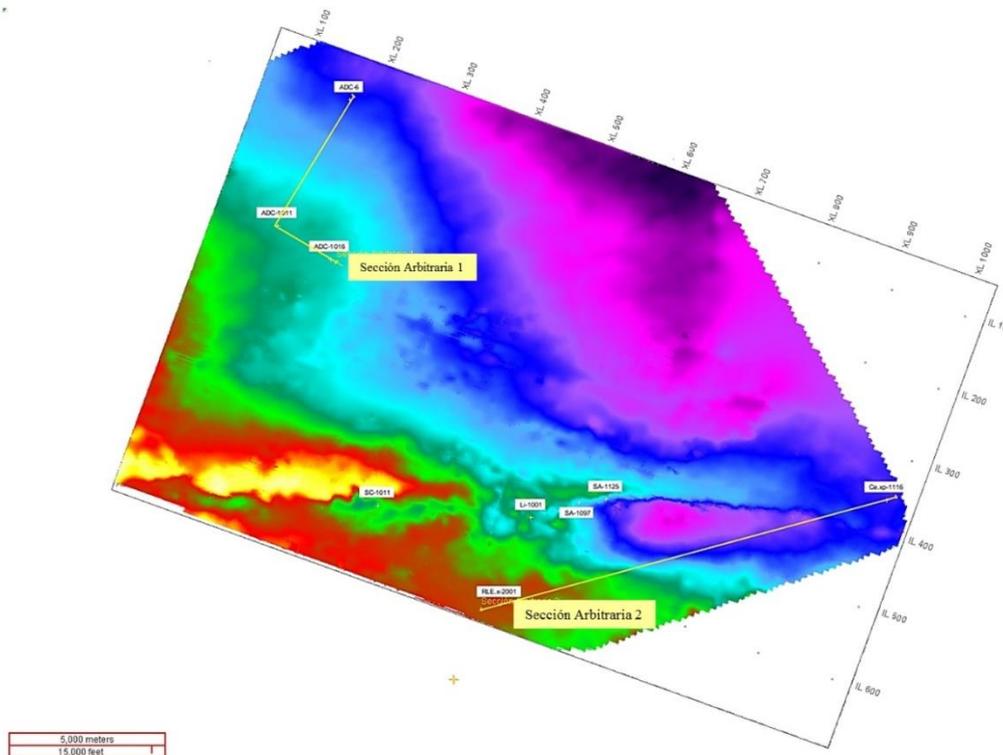


Figura 30. Distribución de los pozos correlacionados con la sísmica, sobre el isócrono correspondiente a la base del Gr. Neuquén.

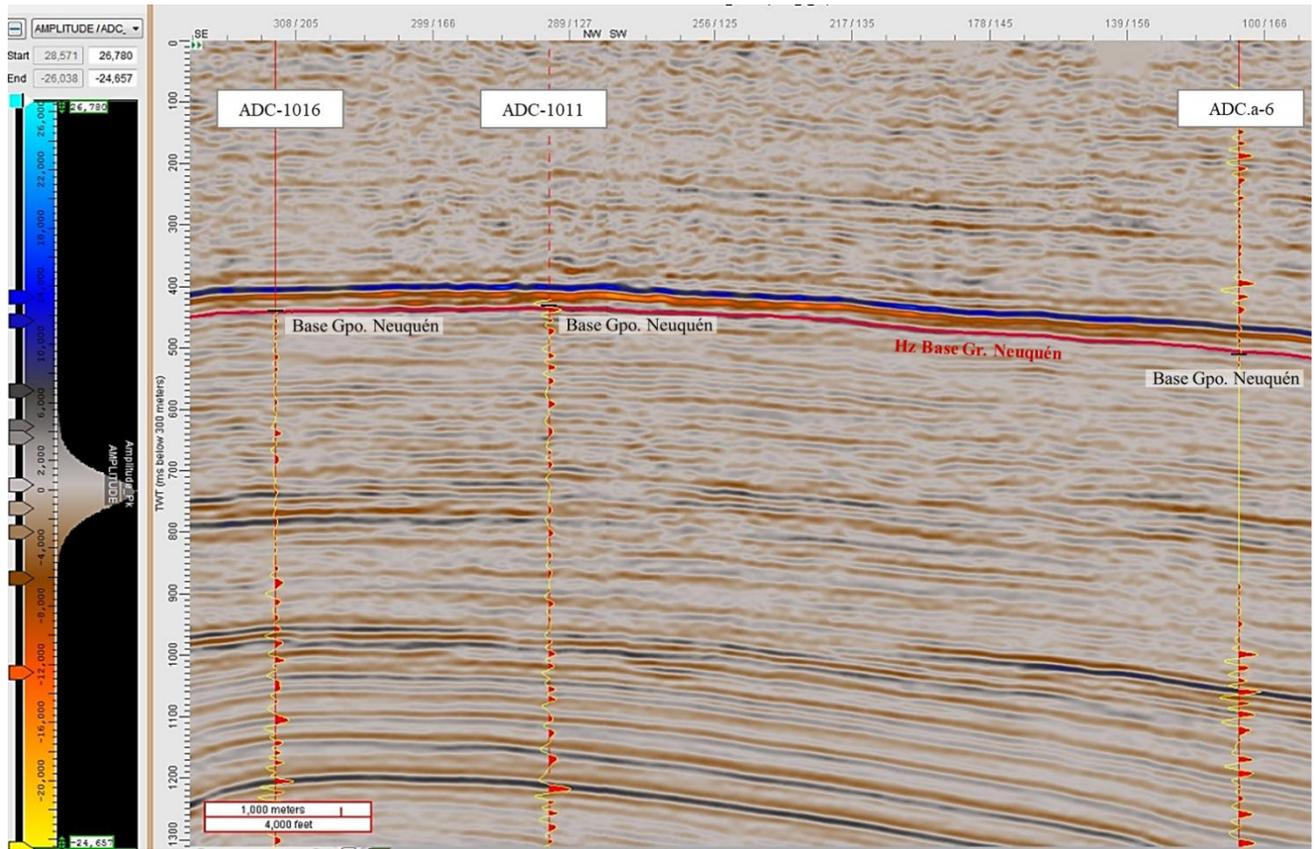


Figura 31. Sección arbitraria 1, correlación sísmica. Ubicación de la sección sísmica en la Fig. 30.

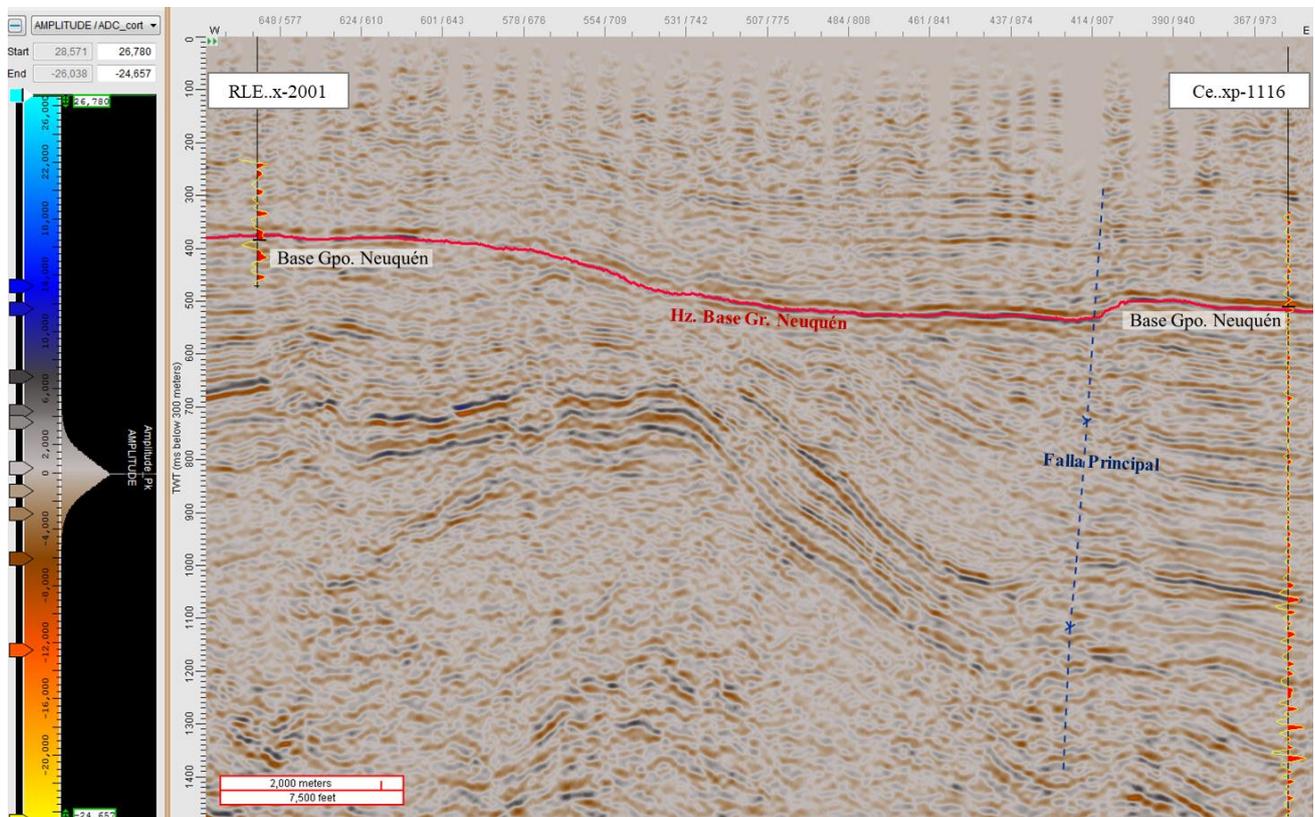
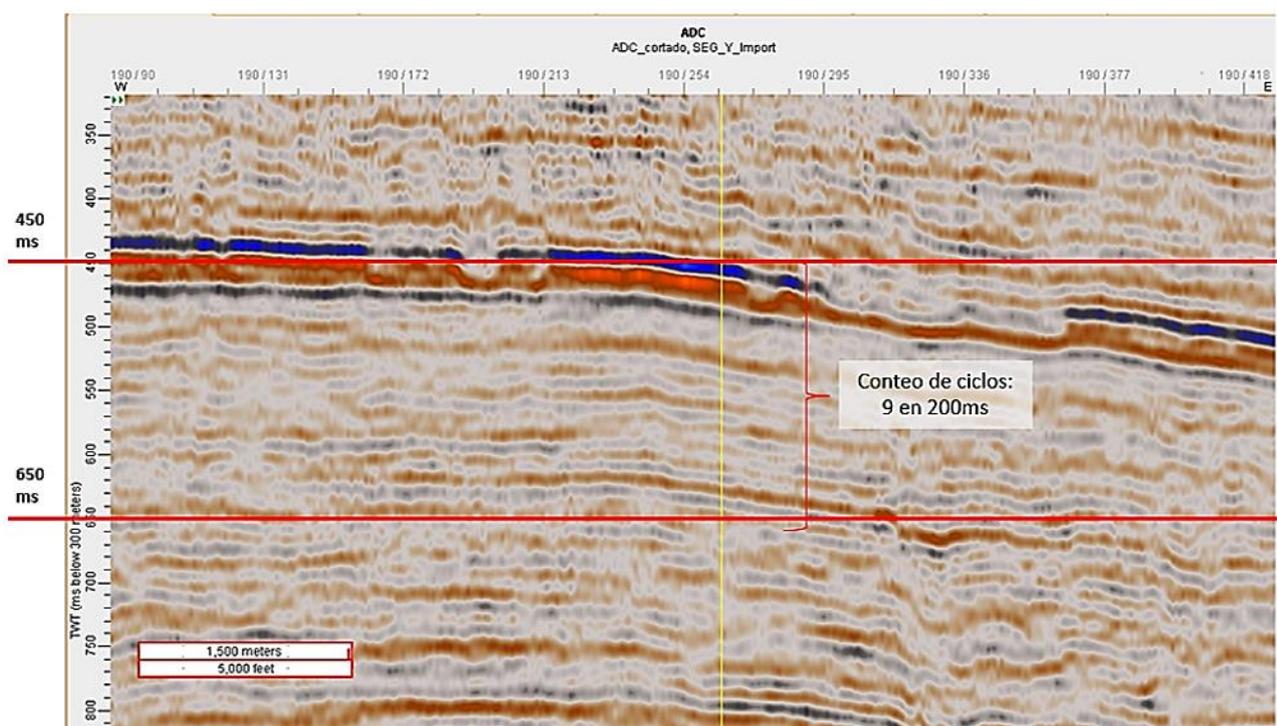


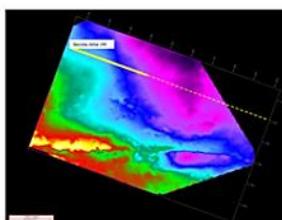
Figura 32. Sección arbitraria 2, correlación sísmica. Ubicación de la sección sísmica en la Fig. 30.

Determinación de resolución sísmica

Se calculó la resolución sísmica en el intervalo de interés a partir de las ecuaciones 15, 16 y 17. Tanto para el cálculo de la velocidad (v) como para el de la frecuencia, se tomaron datos en el intervalo de 450-650 ms. Se utilizó una velocidad promedio de 3400 m/s, obtenida a partir de perfiles sónicos de pozo utilizando la conversión ($v[m/s]=304800/DT[us/ft]$). La frecuencia corresponde a la cantidad de ciclos en un segundo; entonces, para calcular la frecuencia promedio en el intervalo de 200 ms, se procedió a contar la cantidad de ciclos presentes, contando la cantidad de reflectores positivos o negativos y luego se llevó este resultado al equivalente de ciclos para un segundo. De este modo la frecuencia resultó en 45 Hz (Fig. 33) siendo la longitud de onda 75.5 m. Finalmente la resolución vertical para dicho intervalo resultó en 18.8 m y la resolución horizontal 37.75 m.



Ubicación de la línea sísmica



Cálculo de frecuencia:

Cantidad de ciclos en 200 ms = 9

Cantidad de ciclos en 1000 ms = $(9 \times 1000 \text{ ms}) / 200 \text{ ms}$
 Cantidad de ciclos en 1000 ms = 45

Cantidad de ciclos en 1 s (Frecuencia) = 45 Hz

Figura 33. Intervalo de tiempo utilizado para el cálculo de la resolución sísmica, observado en una sección sísmica *inline*.

No se calculó la resolución en niveles superiores a estos puesto que la señal del dato sísmico se ve empobrecida ya que no fue la profundidad objetivo en la adquisición y se observa por ejemplo, la influencia del *footprint*⁴ (Fig. 34).

⁴ *Footprint*: La huella de adquisición (*acquisition footprint*) es un término que se utiliza para definir al registro asociado a la falta de cobertura o cobertura desigual. Se observa en segmentos de tiempo sísmico 3D como un entrelazado lineal paralelo a las direcciones de las líneas fuentes y las líneas receptoras. Por lo general, se pueden ver en segmentos de tiempo poco profundos o mapas de amplitud del horizonte, enmascarando las anomalías de amplitud reales.

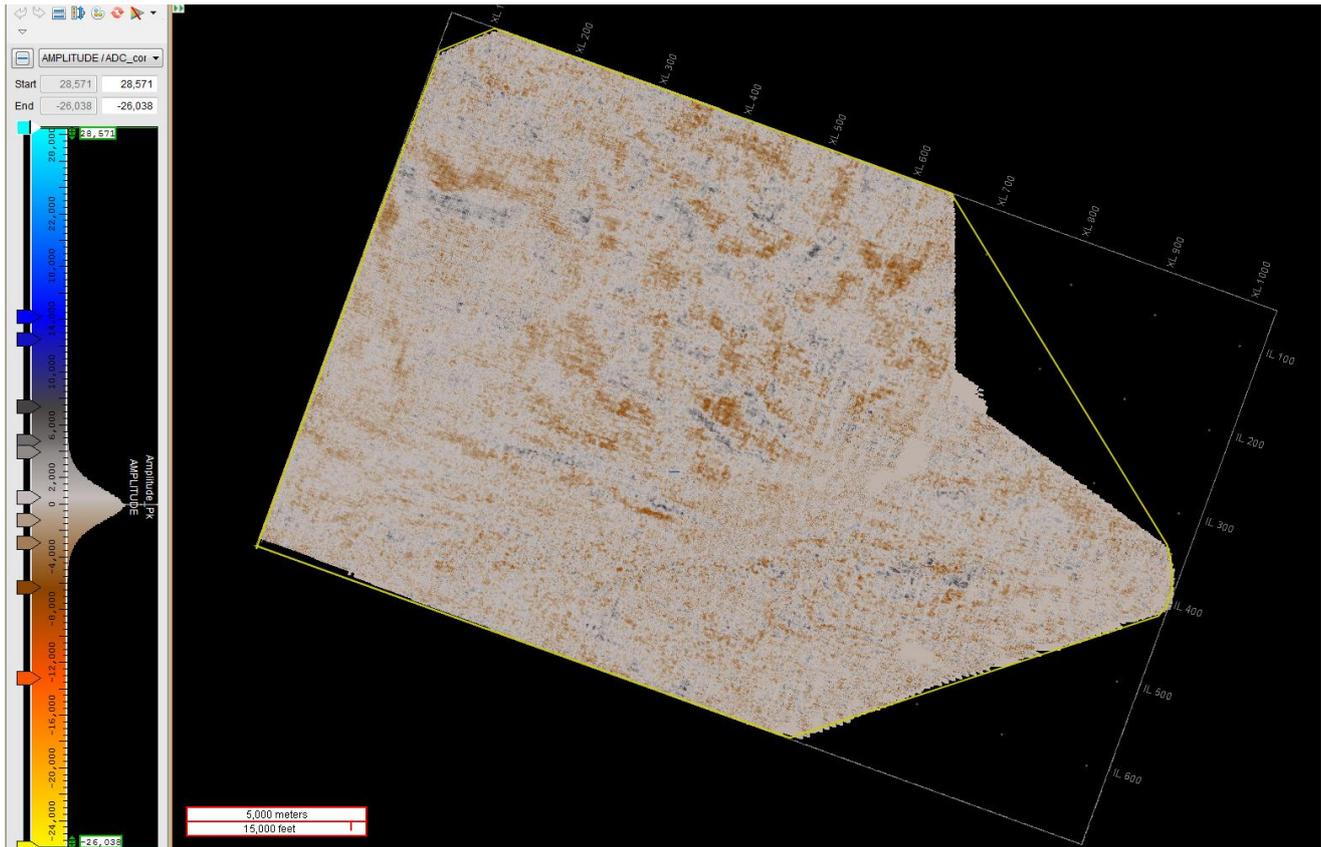


Figura 34. Huella de adquisición (*footprint*) observado en una sección horizontal somera (250 ms). Se observa claramente la geometría de adquisición, en forma de líneas entrecruzadas paralelas a las *inlines* y *crosslines*.

Interpretación de horizontes sísmicos y fallas en el entorno de interés

Se interpretaron dos horizontes sísmicos. Por un lado, se interpretó el horizonte correspondiente a la base del Gr. Neuquén, nivel de interés para el presente trabajo. Para este se tomó como referencia el horizonte correspondiente a la discordancia Patagónica, fácilmente reconocible al sur del área. Dado que la unidad subyacente varía dependiendo del sector del área, se optó por mencionar a este horizonte como "Base del Gr. Neuquén" o "Discordancia Patagónica", y no como el tope de la unidad inferior. Por otro lado, se interpretó un horizonte ubicado a mayor profundidad con el objetivo de entender mejor la estructura del área, principalmente en cercanías a la Dorsal de Huincul. Se cree que el mismo correspondería a un nivel cercano a la Fm. Mulichinco.

Los horizontes fueron interpretados siguiendo una grilla cuyo distanciamiento entre *inlines* y *crosslines* varió según la zona del área. En general se siguió un esquema de 20 *inlines* por 20 *crosslines*, pero en cercanías a la zona más estructuralmente deformada fue necesario reducir este espaciado, ya que el seguimiento del horizonte se vio dificultado por la densidad de fallas. Posteriormente, se realizó un interpolado a partir de los datos existentes, con el objetivo de cubrir toda el área. También se aplicó un filtro (*Smooth*), para suavizar las irregularidades.

Teniendo en cuenta que los niveles correspondientes al Gr. Neuquén se depositan mayormente de manera paralela a su base, se utilizó la tendencia dada por el reflector correspondiente a la base del Gr. Neuquén para generar un horizonte sísmico más somero, que se correspondiera con el límite Tope Gr. Neuquén basal, interpretado en registros de pozos. Se determinó la diferencia de tiempo entre este límite y la base del Gr. Neuquén mediante la correlación realizada entre los pozos y la sísmica. Este

tiempo se restó al horizonte de la base del Gr. Neuquén. Se obtuvo, de esta manera, un tercer horizonte sísmico paralelo al anterior, a una profundidad en que el dato sísmico no permite la interpretación de horizontes.

Por otro lado, con el fin de analizar los rasgos estructurales del área, se interpretaron aquellas fallas existentes en el entorno de interés (Fig. 35). Fundamentalmente, se interpretó la totalidad de una gran falla (Falla Principal) que atraviesa el área en el sector sur, asociada a la Dorsal de Huincul. Se siguió un distanciamiento de 5 líneas e interpretó en secciones *inline* o *crossline* dependiendo de la orientación de la falla.

Un atributo sumamente útil para interpretar fallas es el atributo de discontinuidad, el cual se utilizó para observar los rasgos en planta (Fig. 36).

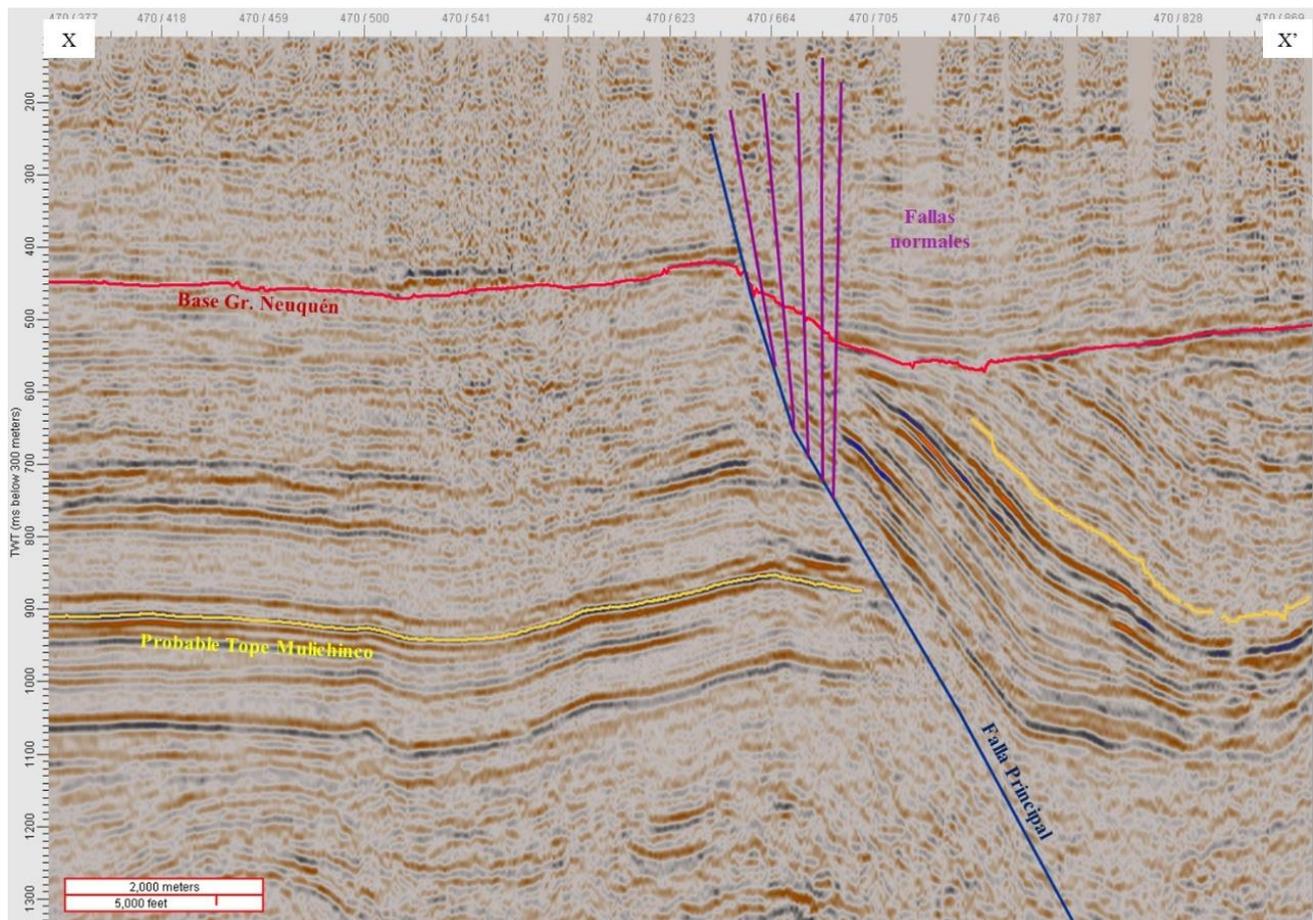


Figura 35. Interpretación estructural. Sección sísmica *inline*, su ubicación se observa en la figura 36.

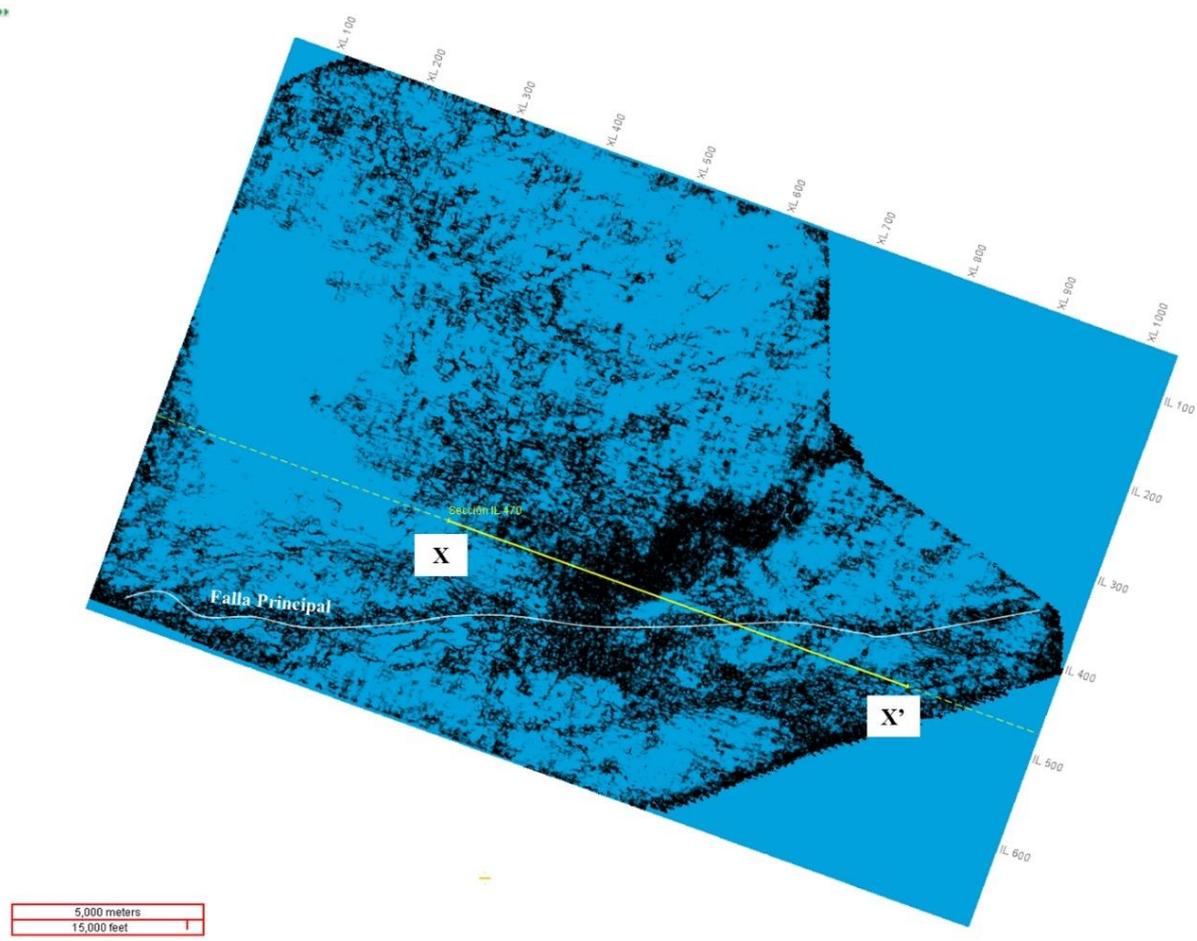


Figura 36. Atributo de discontinuidad observado en sección horizontal a los 400 ms. Se marca el rasgo que muestra la orientación de la Falla Principal. Se indica la ubicación de la transecta de la Fig. 35.

Mapas isócronos

Los mapas isócronos muestran la estructura de una superficie en tiempo sísmico. Para su confección se utilizó tanto el dato del horizonte interpretado como la falla principal. En la Fig. 37 se muestra el mapa estructural en tiempo resultante de la interpretación de la base del Gr. Neuquén y en la Fig. 38 el horizonte sísmico obtenido para el Tope Gr. Neuquén basal.

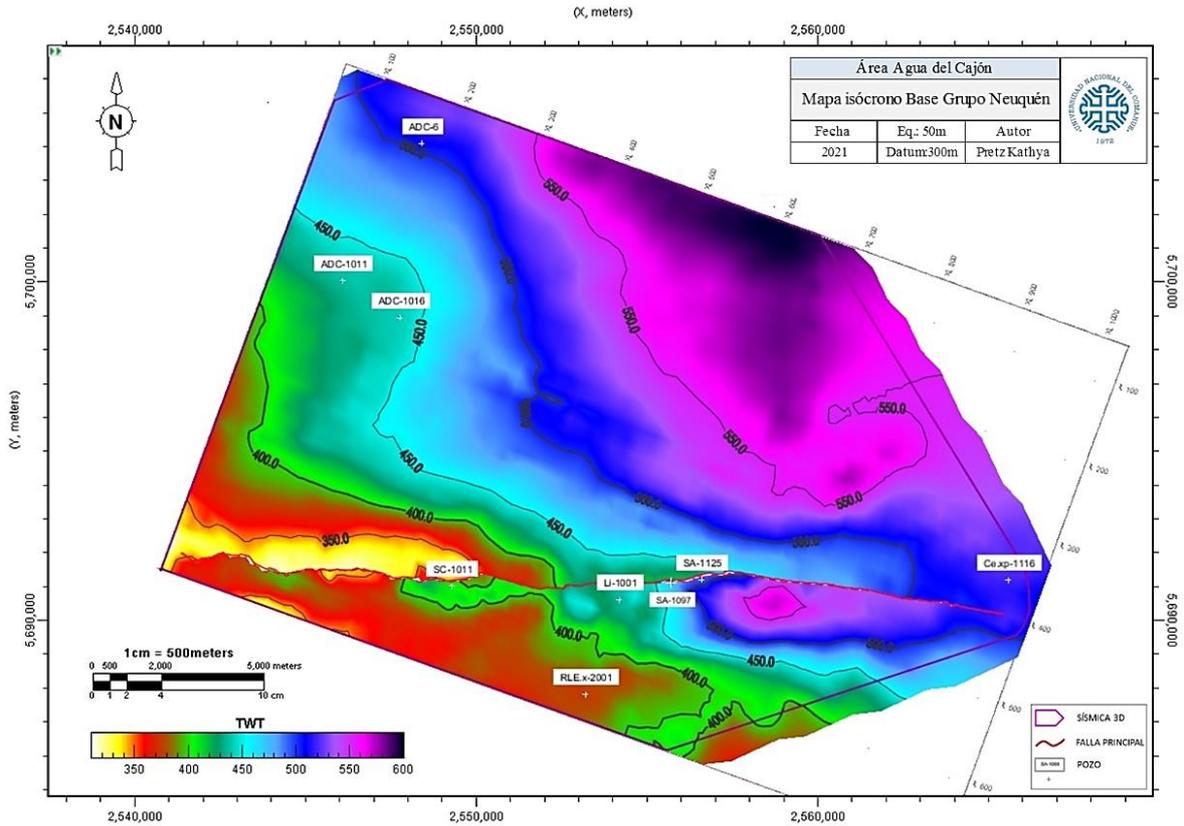


Figura 37. Mapa isócrono de la base del Gr. Neuquén.

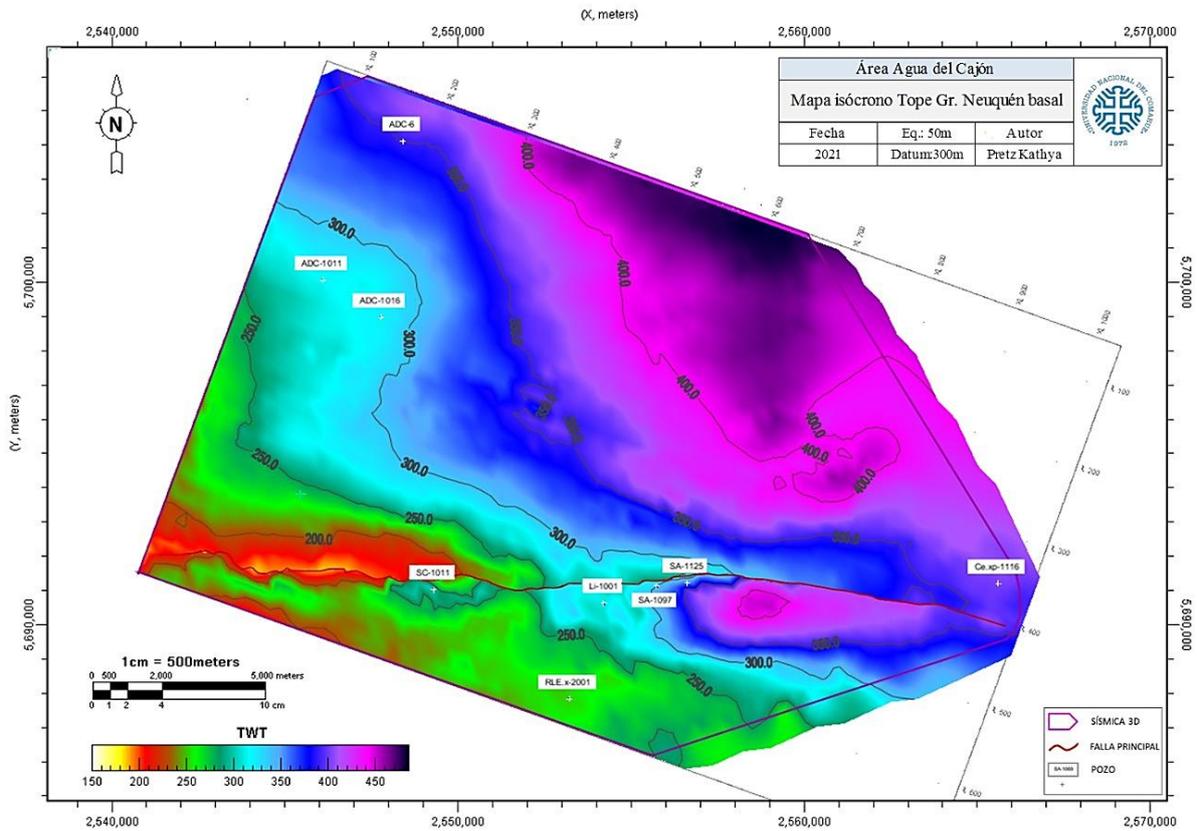


Figura 38. Mapa isócrono del Tope Gr. Neuquén basal.

4.4 Integración datos de pozos-sísmica

Modelo de velocidad somero y conversión a profundidad de horizontes sísmicos

Uno de los objetivos principales de la interpretación sísmica es la creación de modelos estructurales en profundidad. Esto se logra a partir de la conversión tiempo-profundidad. Por definición, sólo existe una manera de relacionar ambos y es conocer la velocidad de propagación de las ondas a través del medio, por lo tanto, para lograr la conversión es necesario contar con un modelo de velocidades. Existen distintos métodos a aplicar, lo cual dependerá de la información con la que se cuente.

En el presente trabajo, se construyeron dos modelos de velocidad enfocados en el tramo más somero de la sísmica, apuntando a los objetivos de interés (Tabla 7).

Por un lado, para la base del Gr. Neuquén, se construyó un modelo de velocidad (Modelo 1) incluyendo: El horizonte sísmico correspondiente a la base del Gr. Neuquén, las tablas tiempo-profundidad (T-Z) de 8 pozos con perfil sísmico y los pases interpretados a partir de los perfiles geofísicos (de acuerdo a lo descripto anteriormente en el apartado 4.2) en 16 pozos.

Se construyó también otro modelo, para el tope del Gr. Neuquén basal, interpretado a partir de registros geofísicos de pozos (Modelo 2). No se contó con tablas T-Z para este caso, ya que no había registros sísmicos para dicho tramo. Sólo se incluyeron los pases interpretados en 18 pozos y el horizonte correspondiente a Tope Gr. Neuquén basal.

Finalmente, se aplicaron dichos modelos a la conversión de los horizontes sísmicos para obtener mapas estructurales de cada uno en profundidad.

	MODELO 1		MODELO 2
	Tabla T/Z	Pase	Pase
ADC.x-8		X	X
ADC.a-6	X	X	X
ADC-1011	X	X	
ADC-1016	X	X	X
ADC-5			X
Ce.xp-1116	X	X	
CE-037		X	X
CeO.x-1		X	X
Lí-1001	X	X	X
RL.x-2		X	X
RLE.x-2001	X	X	X
Sa-0002			X
Sa-1004		X	X
Sa-1021		X	X
Sa-1043		X	X
Sa-1069		X	
Sa-1097	X	X	X
Sa-1125			X
Sa-1167			X
SC-1011	X	X	X
SN.x-3			X
Horizonte utilizado	Base Gpo. Neuquén		Tope Gpo. Neuquén basal

Tabla 7. Información utilizada para la construcción de los modelos de velocidad.

5. Resultados y discusiones

5.1 Zonificación de unidades acuíferas

Categoría AC1: Niveles a proteger

En la transecta de la Fig. 39 se muestra la zonificación de aquellos niveles con salinidades menores a 3000 ppm y por ende, aquellos a proteger. Dada la naturaleza multicapa de las rocas del Gr. Neuquén, se correlacionaron unidades hidrogeológicas y no capas en detalle. Si bien la mayoría de los niveles con estas condiciones se encuentran en la parte más somera del Gr. Neuquén, también se identificaron niveles con salinidades menores a 3000 ppm por debajo del mismo. Cabe destacar que entre estos dos se observa claramente un límite regional que los separa, teniendo el mismo un espesor de aproximadamente 300 m.

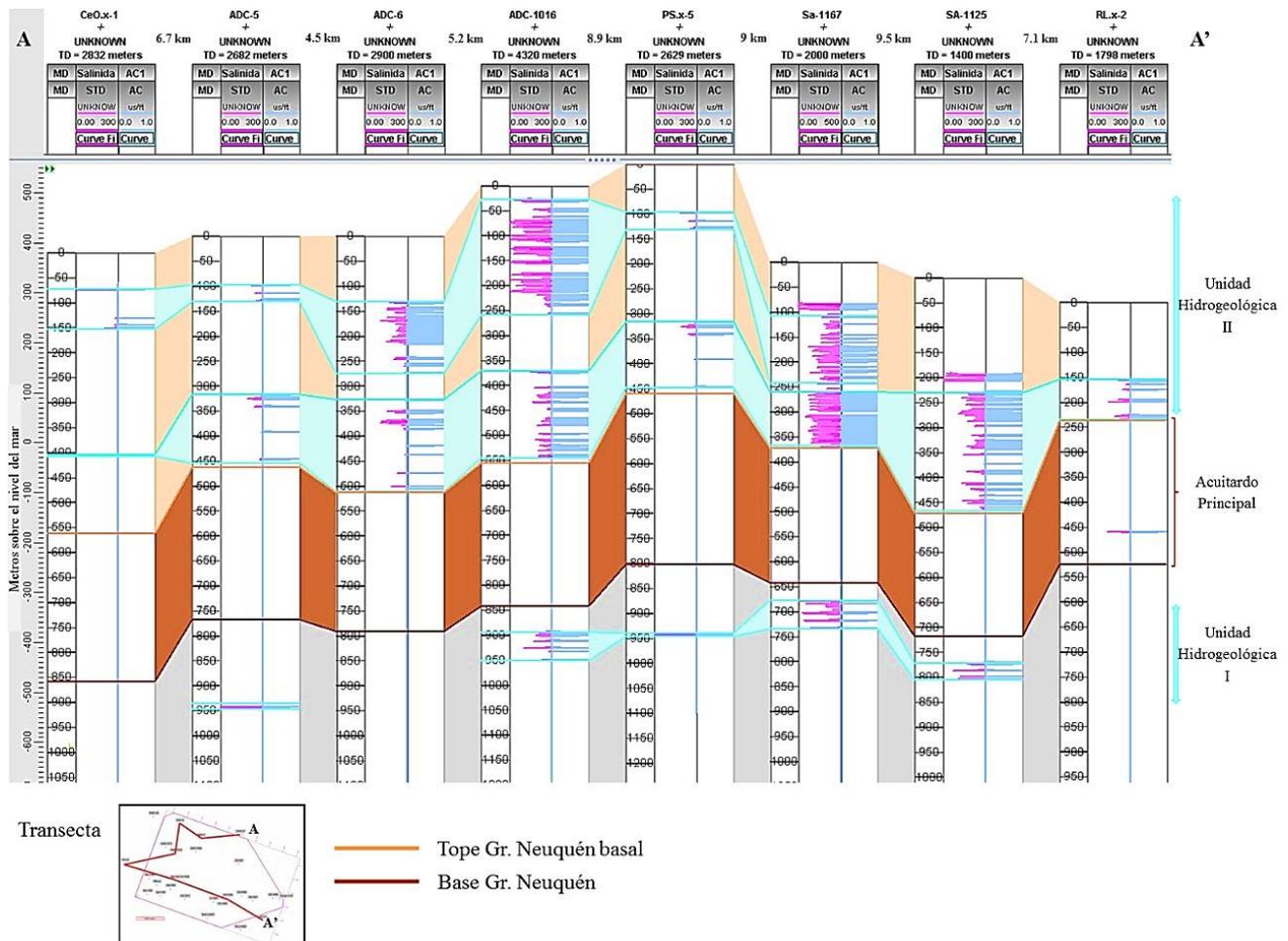


Figura 39. Transecta clasificación AC1. Profundidad medida en msnm. Profundidad medida en el pozo (MD, pista 1), salinidad calculada a partir del perfil de resistividad (STD, pista 2), clasificación AC1 (pista 3).

Categoría AC2: Buenos niveles acuíferos

En la transecta de la Fig. 40 se observa la comparación entre las categorías AC1 y AC2. En esta última se discriminan no sólo aquellos niveles con salinidades menores a 3000 ppm, sino también aquellos con litologías y porosidades óptimas para su explotación.

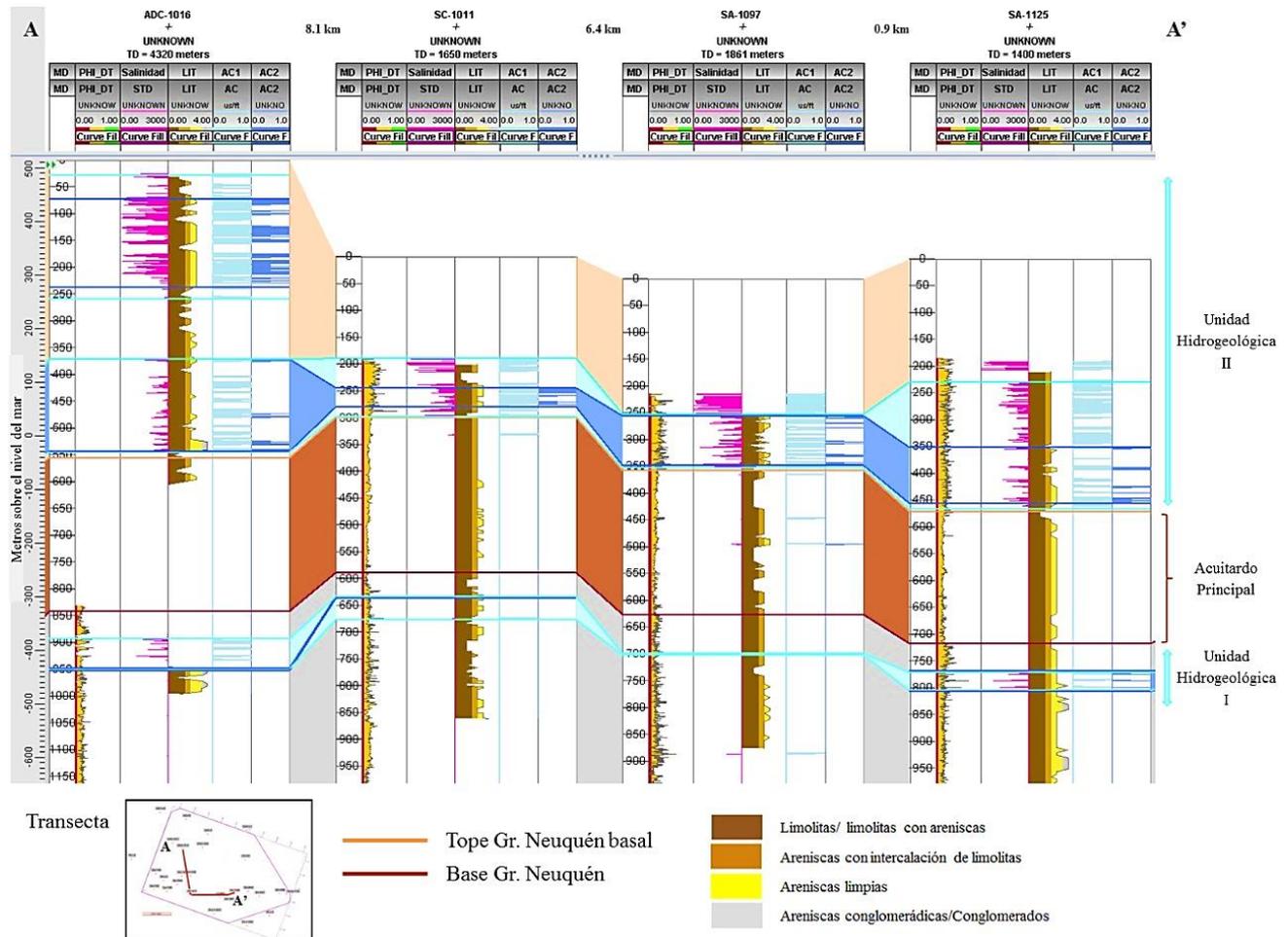


Figura 40. Transecta comparativa entre las clasificaciones AC1 y AC2. Profundidad medida en msnm. Profundidad medida en el pozo (MD, pista 1), porosidad calculada a partir de perfil sónico (PHI_DT, pista 2), salinidad calculada a partir del perfil de resistividad (STD, pista 3), perfil litológico elaborado a partir del cutting (LIT, pista 4), clasificación AC1 en azul claro (pista 5), clasificación AC2 en azul oscuro (pista 6).

Categoría AC3: Potenciales acuíferos tratables

En la transecta de la Fig. 41 se observa la comparación entre las categorías AC1 y AC3. Los niveles AC3 corresponden a aquellos con salinidades de hasta 5000 ppm (que incluye a la categoría AC1 con salinidades de hasta 3000 ppm). Se puede observar que los límites de las zonas en general se corresponden con aquellas de AC1, pero su continuidad vertical aumenta considerablemente.

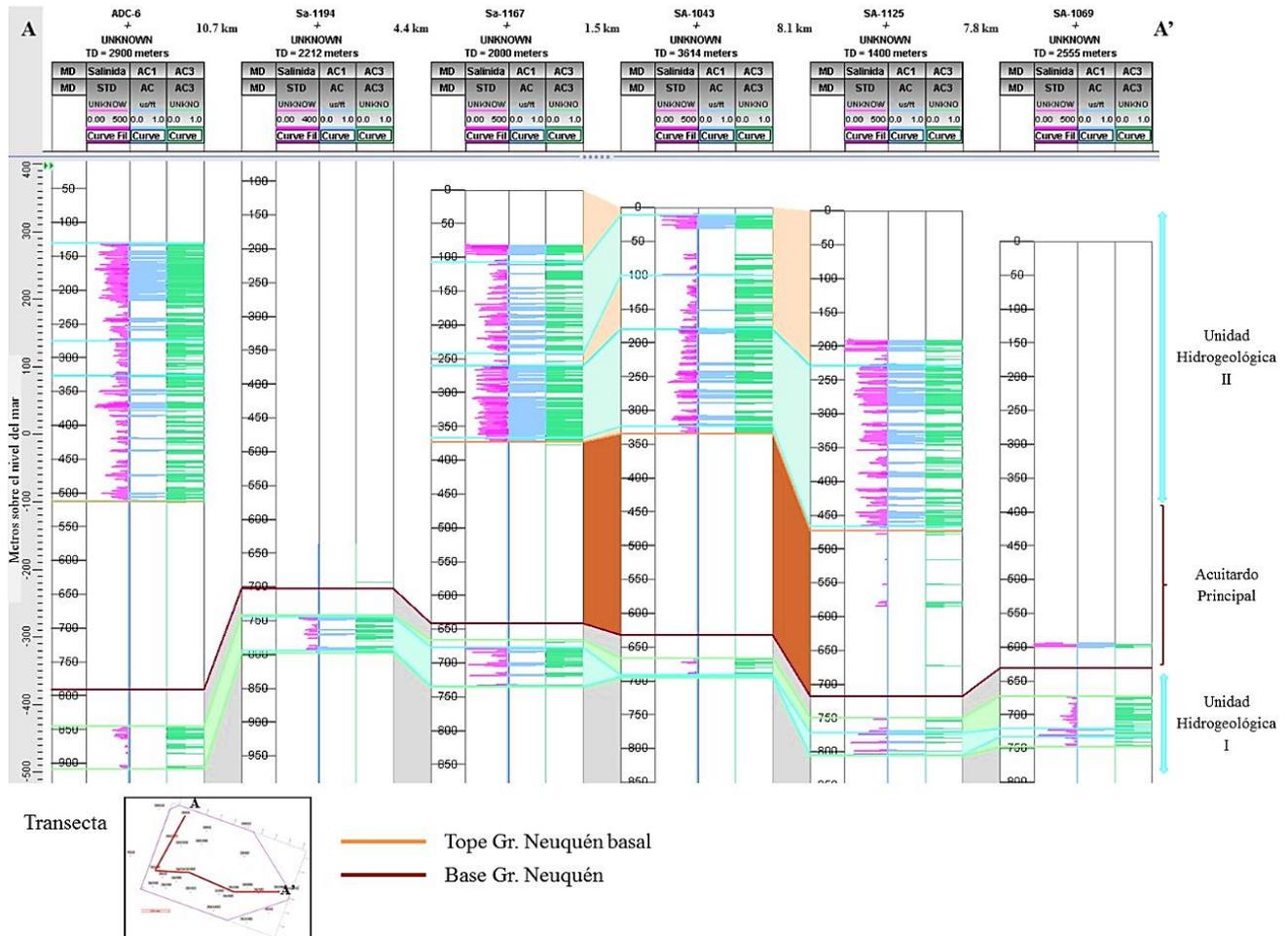


Figura 41. Transecta comparativa entre las clasificaciones AC1 Y AC3. Profundidad medida en msnm. Profundidad medida en el pozo (MD, pista 1), salinidad calculada a partir del perfil de resistividad (STD, pista 2), clasificación AC1 en azul claro (pista 3), clasificación AC3 en verde (pista 4).

A partir de los datos presentados, se interpretaron dos (con una posible tercera) unidades hidrogeológicas con presencia de agua con salinidades menores a 3000 ppm de sales totales, siguiendo la categoría AC1 (Tabla 8). Una unidad hidrogeológica profunda de poco espesor por debajo del Gr. Neuquén (Unidad Hidrogeológica I), y otra de mucha mayor dimensión dentro del Gr. Neuquén, con espesores desde 100 hasta casi 400 metros (Unidad Hidrogeológica II). Podrían subdividirse a su vez dos unidades dentro de esta última, ya que se observa en aquellos pozos con perfiles someros (pozos ADC-5, ADC-6, ADC-1016, CeO.x-1, PS.x-5, SA-1167, SA-1043 observados en las figuras 39 y 40) una tercera unidad hasta los 150-250 mbbp separada de la subyacente por espesores variables. Se interpreta también como acuitardo regional (nombrado Acuitardo Principal) a los casi 300 m de rocas que se encuentran entre y limitan las unidades hidrogeológicas I y II, las cuales presentan una litología

que dificulta la transmisión del agua y la gran mayoría tampoco presenta salinidades menores a 3000 ppm. Inmediatamente debajo de la base del Gr. Neuquén y por sobre los toques de la Unidad Hidrogeológica I, existe también un nivel de espesores variables entre 5-30 m perteneciente a la Fm. Rayoso/Candeleros, que no presenta propiedades acuíferas. Dentro de los niveles con salinidades menores a 3000 ppm, las salinidades promedio son de 1880 ppm para la Unidad Hidrogeológica I y 2430 ppm para la Unidad Hidrogeológica II.

Cada categoría realizada en el estudio conlleva distintas aplicaciones: La categoría AC1, quizás la más utilizada en la industria petrolera, tiene una finalidad principalmente ambiental, ya que corresponde a aquellos niveles a proteger según lo establecido por ley. La categoría AC2 le suma a la anterior la distinción de niveles particularmente óptimos también para la explotación de acuíferos. Y por último, con la categoría AC3 se tiene la intención de demostrar cómo al flexibilizar el límite de salinidad los espesores aumentan considerablemente, siendo estos potencialmente utilizables con un pequeño tratamiento en caso de futura necesidad. Esto último aplica especialmente para la Unidad Hidrogeológica I, ya que si bien los niveles con salinidades menores a 3000 ppm debajo del Gr. Neuquén son aislados y de muy poco espesor, al aumentar un poco el límite de salinidad hasta 5000 ppm, se observa que estos aumentan notablemente su continuidad vertical, haciéndolos más interesantes desde el punto de vista explotable, considerando también que se encuentran en rocas con litologías favorables.

Acuífero	Límite	Profundidad (mbbp)		Porosidad promedio
		Min	Max	
Unidad Hidrogeológica II	Techo	11	130	27%
	Base	234	545	
Acuitardo regional	Techo	184	560	16%
	Base	508	859	
Unidad Hidrogeológica I	Techo	525	939	16%
	Base	533	949	

Tabla 8. Profundidades mínimas y máximas de los techos y bases de las distintas unidades hidrogeológicas delimitadas.

5.2 Mapas de niveles acuíferos

A partir de la identificación de las unidades hidrogeológicas I y II, se generaron tres mapas estructurales de los niveles de interés. Se utilizaron los límites de las unidades hidrogeológicas determinados para la categoría AC1, ya que es la categoría que abarca aquellas zonas a proteger obligatoriamente.

Máxima profundidad de agua dulce a proteger:

La máxima profundidad de agua dulce a proteger se corresponde con la base de la Unidad Hidrogeológica I. Indica la cota límite hasta la cual se encuentra agua con salinidades menores a 3000 ppm, determinado a partir de registros de pozos.

Este mapa en particular (Fig. 42) se realizó a partir de la interpolación de pases marcados en los pozos que se muestran en el mismo. Cabe aclarar por qué no se utilizó un horizonte sísmico para el mapeo

de éste nivel; a diferencia de los otros límites, éste no se correlaciona con ningún nivel específico identificado ni en los registros de pozos ni en la sísmica. Sin embargo, se incorporó el rasgo estructural correspondiente a la Falla Principal a la realización del interpolado de la información.

Base del Gr. Neuquén

La base del Gr. Neuquén fue el principal nivel guía para realizar las correlaciones. Además, este nivel se corresponde con la base del Acuitardo Principal y es un límite muy cercano a los topes de la Unidad Hidrogeológica I. El mapa en profundidad (Fig. 43) se elaboró a partir de datos puntuales y “duros”, que corresponden a los pases interpretados en cada pozo, y se complementó con la interpretación del horizonte sísmico convertido a profundidad, el cual le otorgó el carácter regional. A través de la aplicación de herramientas del software utilizado, se combinaron ambos datos para su elaboración.

Base de la Unidad Hidrogeológica II

La base de la Unidad Hidrogeológica II se corresponde con el límite Tope Gr. Neuquén basal. Este mapa muestra la base de la unidad acuífera más somera, correspondiente también con el tope del Acuitardo Principal.

El mapa (Fig. 44) se elaboró de manera análoga al mapa de la base del Gr. Neuquén; se utilizaron los pases de registros de pozos y el horizonte sísmico correspondiente a Tope Gr. Neuquén basal, convertido a profundidad.

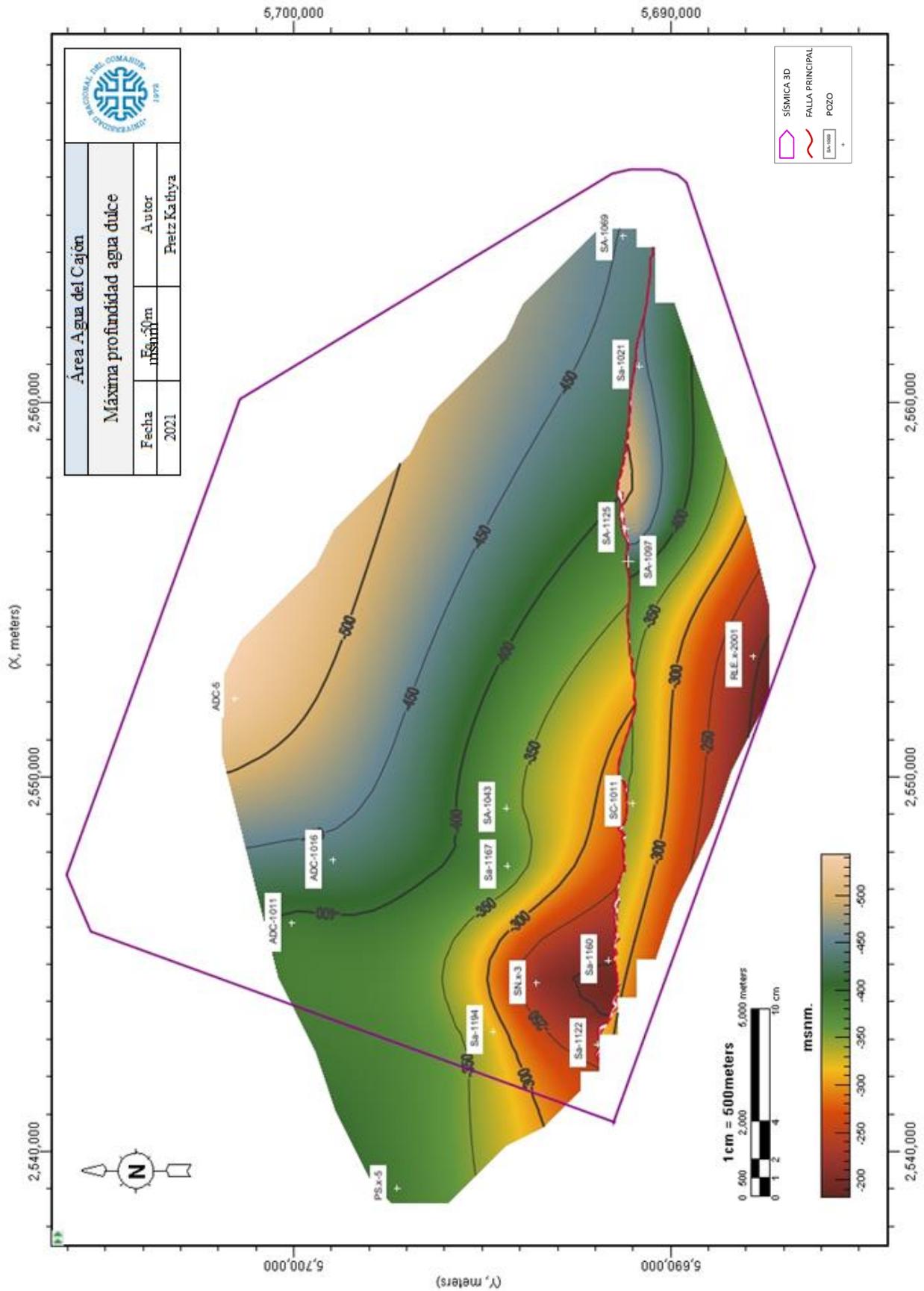


Figura 42. Mapa estructural de la máxima profundidad de agua dulce (salinidades menores a 3000 ppm) presente en el área, correspondiente a la base de la Unidad Hidrológica I.

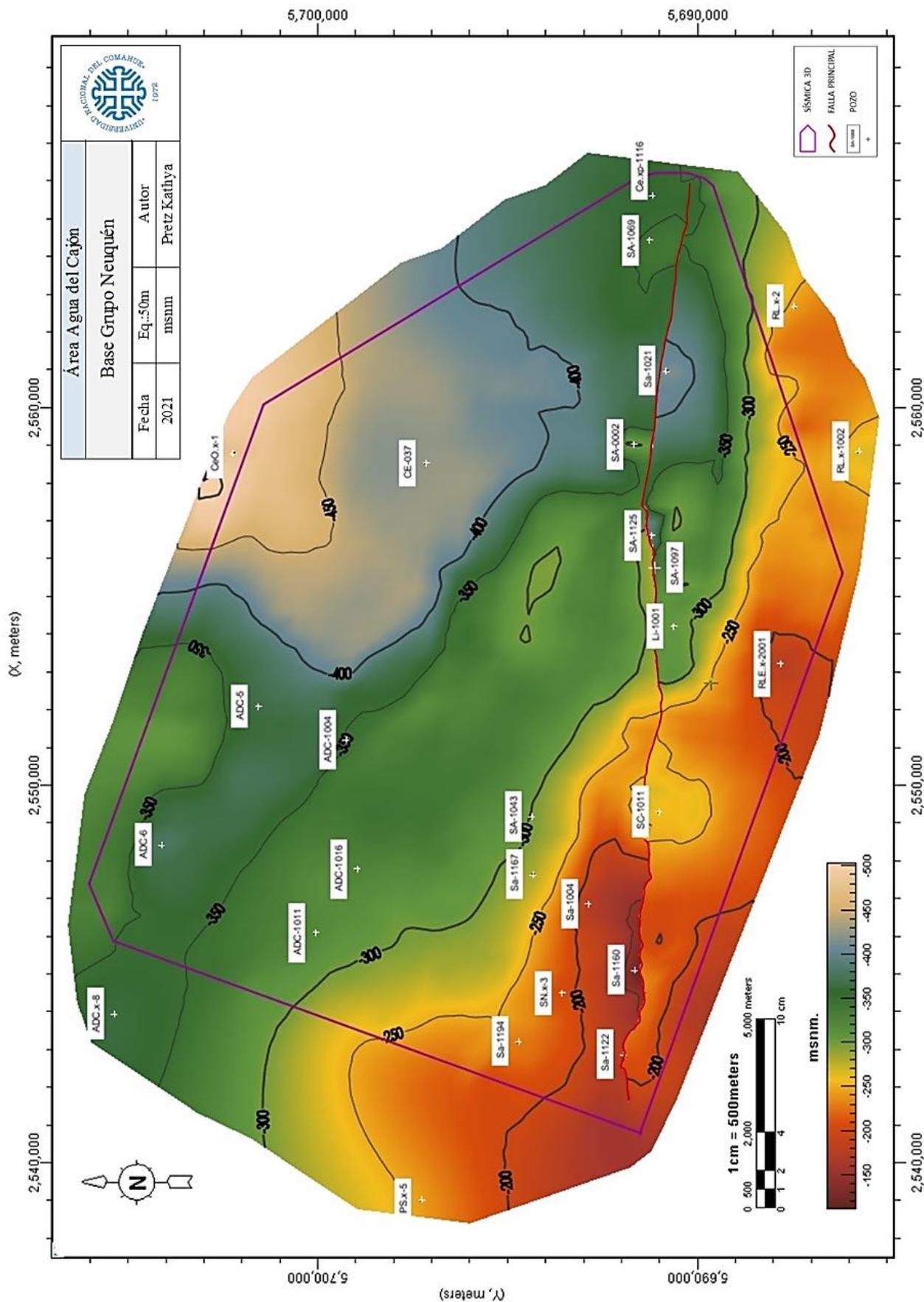


Figura 43. Mapa estructural de la base del Gr. Neuquén, correspondiente a la base del Acuitardo Principal.

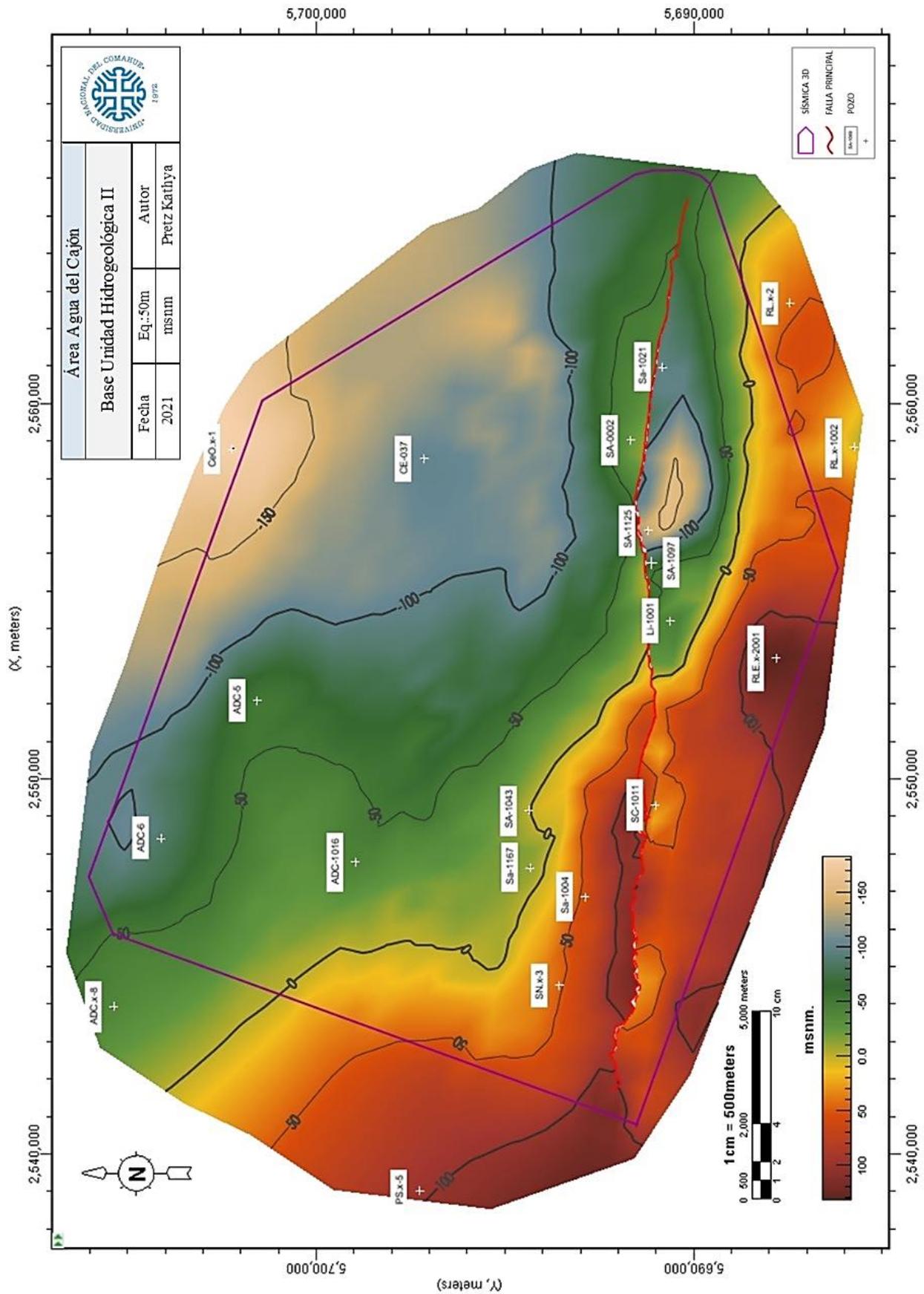


Figura 44. Mapa estructural de la base de la Unidad Hidrogeológica II, correspondiente también al tope del Acuitardo Principal.

5.3 Rastros de hidrocarburos

En varios pozos ubicados en las proximidades inmediatas a la falla principal, los controles de pozos detectaron rastros de hidrocarburos hasta en profundidades de 65 mbbp (pozo Li-1001). Este rasgo se observó en 5 pozos (Fig. 45), pero se cree que podría repetirse de manera general en el sector sur. La altísima densidad de fallas presentes en este sector podrían haber sido las causantes de la migración de hidrocarburos hasta niveles tan someros. Por lo tanto, si bien se encontraron niveles con salinidades menores a 3000 ppm dentro y por debajo del Gr. Neuquén en toda el área, es probable que el agua presente en aquellas rocas esté contaminada en mayor o menor medida.

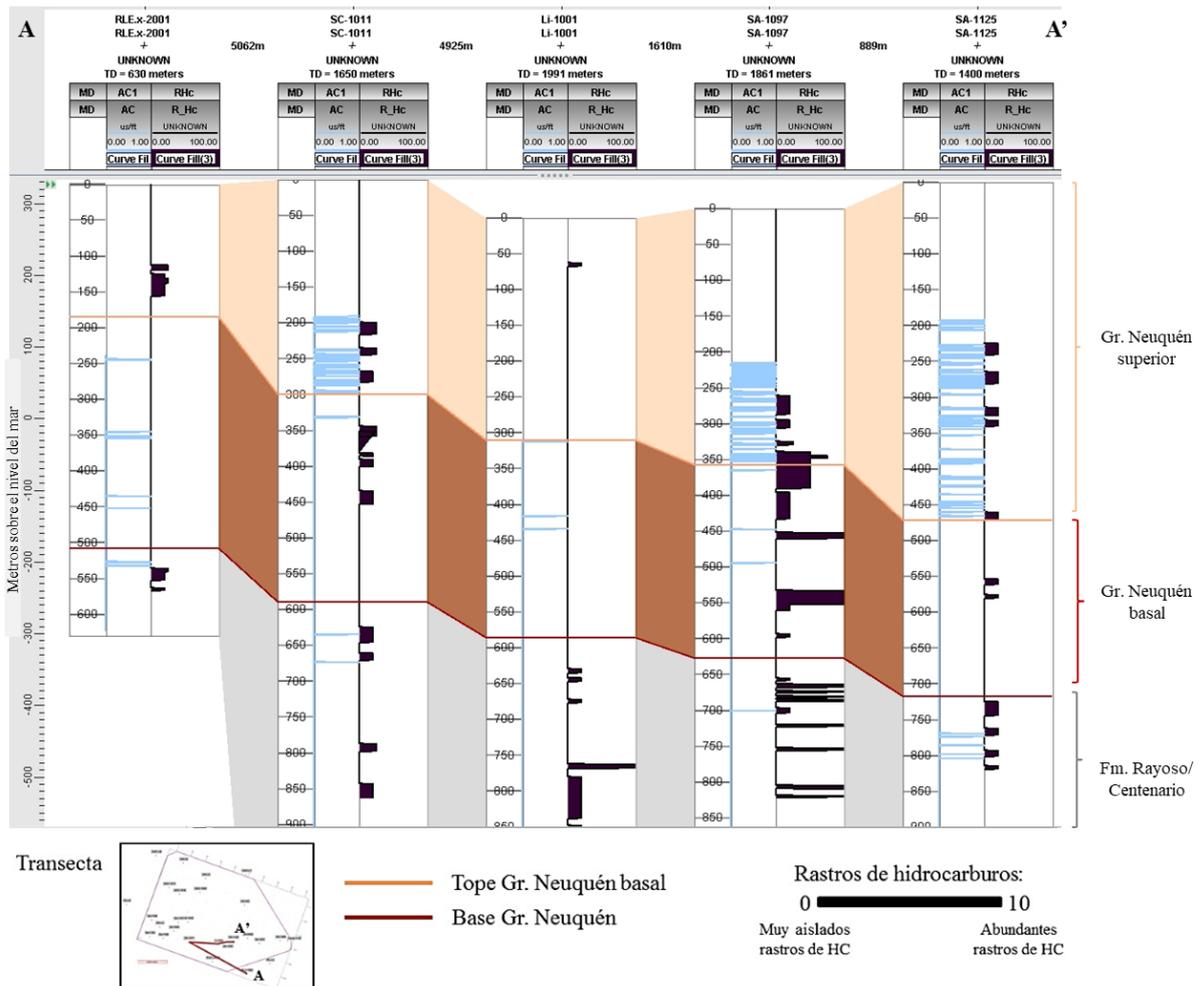


Figura 45. Rastros de hidrocarburos registrados en los pozos disponibles para este estudio. Profundidad medida en el pozo (MD, pista 1), clasificación AC1 en azul claro (pista 2), rastros de hidrocarburos (pista 3).

6. Conclusiones y recomendaciones

- En el presente estudio se determinaron, a partir de registros eléctricos de pozos e interpretación sísmica, unidades acuíferas dentro de los primeros 1000 mbbp en el área correspondiente al área de concesión Agua del Cajón. La cantidad y distribución dependen de los criterios utilizados. En este trabajo se proponen tres tipos de categorías y se mapean los límites en base al criterio AC1, en el cual se discrimina aquellos niveles con presencia de agua dulce con menos de 3000 ppm de sales totales, a fin de abarcar la totalidad de zonas acuíferas a proteger según la Ley Provincial N° 2267. El análisis determinó que las zonas acuíferas se encuentran dentro de los niveles superiores del Gr. Neuquén e inmediatamente debajo de la base de éste. También se determinó la presencia de un potente paquete de rocas entre estas, que actuaría como acuitardo regional, asociado principalmente a la Fm. Candeleros.
- Para proteger las unidades acuíferas presentes en el área Agua del Cajón, los pozos destinados a la industria hidrocarburífera deberían tener una cañería guía desde boca de pozo hasta profundidades entre 533 y 950 mbbp, dependiendo de la ubicación en el área. Su distribución se puede observar en el mapa de la Fig. 42.
- Dado que en el presente trabajo no se contó con muestras de agua con análisis químicos, no se puede asegurar que la calidad de la misma sea apta para consumo. En caso de una eventual explotación para dicho fin, deberían realizarse estudios hidroquímicos que corroboren la calidad del agua. Además, como se señala en el apartado 5.3, los acuíferos de la zona sur podrían estar contaminados dada la presencia generalizada de rastros de hidrocarburos hasta niveles muy someros del Gr. Neuquén. Por este motivo, se recomienda poner especial atención en dicha zona.
- Los registros eléctricos que resultaron de mayor utilidad fueron el registro resistivo para la determinación de resistividad del agua y salinidad, y el registro sísmico para la determinación de la porosidad. Si bien el registro de rayos gamma para la determinación del volumen de arcillas es ampliamente utilizado con éxito, en el presente estudio no fue de utilidad ya que se observó que los resultados arrojados no se corresponden con la verdadera litología, por lo menos en el tramo estudiado. En su lugar, para el conocimiento de la litología se utilizaron los datos de controles geológicos como principal guía. Dicho comportamiento observado en el perfil de rayos gamma podría repetirse principalmente en las rocas del Gr. Neuquén en otros yacimientos, por lo que se invita a revisar y tener esto en cuenta en futuros estudios.
- La deficiente información de registros de pozos en zonas someras es la principal desventaja encontrada, ya que los perfiles generalmente se registran a mayores profundidades, asociadas a zonas de interés hidrocarburífero. Sería muy recomendable, que la registración se hiciese desde superficie para contribuir a los fines hidrogeológicos.
- La metodología combinada de datos de pozos con datos de sísmica 3D resultó muy enriquecedora, ya que permitió darle una mejor tendencia regional a los datos puntuales de pozos y así generar mapas que se asemejan más certeramente a la verdadera estructura del subsuelo. La principal limitante de este método es la baja capacidad de interpretación sísmica en profundidades muy someras, dado que los proyectos sísmicos también suelen apuntar al estudio de formaciones profundas.

- El área Agua del Cajón se encuentra influenciada fuertemente en su sector sur por la Dorsal de Huinul, siendo éste el rasgo estructural predominante. La falla principal interpretada tiene una orientación SO-NE a O-E. La misma, de carácter inverso, generó el levantamiento, plegamiento y condensación de las unidades ubicadas al sur, generando incluso la supresión de estratos. Esta podría haber sido generada como consecuencia de la actividad tectónica compresiva que acaeció en la zona a partir del Jurásico medio. Posteriormente y afectando incluso a los depósitos del Gr. Neuquén, se habrían sobrepuesto localmente una serie de fallas normales, con el bloque bajo al S, como se observa en la Fig. 35.

6.1 Futuras líneas de investigación

- Sería enriquecedor implementar la metodología utilizada, a otras zonas de la cuenca neuquina a fin de continuar aportando al conocimiento de la hidrología de subsuelo.
- Una mayor profundización en el grado de detalle de descripción del control geológico en los primeros 1000 mbbp, posibilitaría una mejor distinción de límites formacionales y un mejor conocimiento de las propiedades de las rocas.
- Para una caracterización en detalle de las zonas acuíferas sería ideal complementar dicha metodología con análisis químicos de agua.

7. Bibliografía

- Alberti R. y Sticco M. 2017.** Estudio hidrogeológico del área de Lindero Atravesado Provincia del Neuquén. Hidrogeología, Gestión integrada de Recursos Hídricos. Pan American Energy.
- Alonso, J., A. E., Giusiano, G. y Chebli G., Ibáñez. 2011.** Shale Gas en la Provincia de Neuquén. Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos, Prov. de Neuquén y Phoenix Oil & Gas, S.A.
- 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. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad Nacional del Comahue (Inédito), 105 p., Neuquén.
- Alonso, M., Giusiano, A. y Dufilho, A. 2016.** Caracterización hidrogeológica de la Formación Rayoso y del Grupo Neuquén en el sector centro norte de la Provincia del Neuquén. IX Congreso Hidrogeológico Argentino.
- Archie, G.E. 1942.** *The Electrical Resistivity Logs as an Aid in Determining some Reservoirs Characteristics.* Trans. AIME 146: 54 – 62.
- Arregui, C., Carbone, C. y Leanza, H.A. 2011.** Contexto tectosedimentario. 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. 18º congreso geológico argentino, Relatorio 29-39, Neuquén.
- Bond, L., Denslow, K., Griffin, J., Dale, G., Harris, R., Moran, T., Sheen, D. y Schenkel, T. 2020.** *Evaluation of Non-Nuclear Techniques for Well Logging: Technology Evaluation.*
- Brown, A.R. 2004.** *Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data. AAPG Memoir; 42. SEG Investigations in Geophysics; No. 9.* Sexta edición. *The American Association of Petroleum Geologists and the Society of Exploration Geophysicists.* Tulsa, Oklahoma, U.S.A. Capítulo 1.
- Casadío, S. y Montagna, A.O. 2015.** Estratigrafía de la cuenca neuquina. En: Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros. Ponce J.J., Montagna A.O., Carmona, N. (editores): 9-21. 1ª Edición. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación YPF; Viedma: Universidad Nacional de Río Negro.
- Cazau, L.B. y M.A. Uliana. 1973.** El Cretácico superior continental de la Cuenca Neuquina. Vº Congreso Geológico Argentino. Actas 3: 131-163. En: Garrido, A.C. 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales. 12. 121-177.
- Cingolani, C.A., Zanettini, J.C.M y Leanza, H.A. 2011.** El basamento ígneo y metamórfico. Relatorio 18º Congreso Geológico Argentino.
- Comisión Nacional del Agua. 2007.** Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Prospección geoelectrica y registros geofísicos de pozos. México, D.F.
- Custodio, E. y Llamas, R.M. 1983.** Hidrología Subterránea. Tomo I. Primera Edición. Ed. Omega, Barcelona, España.
- Di Paola, E.C. 1973.** Caracterización litoestratigráfica de la Formación Neuquén. Vº Congreso Geológico Argentino. Actas 3: 197-206. En: Garrido, A.C. 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén,

Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*. 12. 121-177.

Di Paola, E.C. y Marchese H.G. 1970. Relaciones litoestratigráficas entre las Formaciones Rayoso, Candeleros y Huincul, Provincia del Neuquén, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 25(1): 111-120. En: Garrido, A.C. 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*. 12. 121-177.

Ellis, D.V. y Singer, J.M. 2008. *Well Logging for Earth Scientists*. NL: (Ed.) Springer.

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*. En Casadío, S. y Montagna, A.O., 2015. Estratigrafía de la cuenca neuquina. En: Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros. Ponce J.J., Montagna A.O., Carmona, N. (editores): 9-21. 1ª Edición. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación YPF; Viedma: Universidad Nacional de Río Negro.

Garrido, A.C. 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*. 12. 121-177.

Garrido, A.C. 2011. El Grupo Neuquén (Cretácico Tardío) en la Cuenca Neuquina.

Herrero Ducloux, A. 1946. Contribución al conocimiento geológico del Neuquén extrandino. *Boletín de Informaciones Petroleras*, 23 (226): 1- 39. Buenos Aires.

Keys, W.S. 1990. *Borehole Geophysics Applied to Ground-water Investigations*. *Geological Survey (USA)*.

Khatchikian, A. 2011. Registros de pozo. Principios y aplicaciones. Argentina: Edición del Autor.

Leanza, H.A. 2003. Las sedimentitas huitrinianas 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. y Hugo, C.A. 2001. *Cretaceous red beds from southern Neuquén Basin (Argentina): age, distribution and stratigraphic discontinuities*. *7th International Symposium on Mesozoic Terrestrial Ecosystems*. Asociación Paleontológica Argentina, publicación especial 7: 117-122. Buenos Aires.

Leanza, H., Repol, D., Hugo, C. y Sruoga, P. 2005. Hoja geológica 3769-31, Chorriaca, Provincia del Neuquén.

Macdonald, D., Gomez-Perez, I., et al. 2003. *Mesozoic break-up of SW Gondwana: Implications for South Atlantic regional hydrocarbon potential*. En: Casadío, S. y Montagna, A.O. 2015. Estratigrafía de la cuenca neuquina. En: Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros. Ponce J.J., Montagna A.O., Carmona, N. (editores): 9-21. 1ª Edición. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación YPF; Viedma: Universidad Nacional de Río Negro.

Magnano L. 2018. *Determining the salinity of the aquifers overlying Vaca Muerta geological formation in Neuquén, Argentina*. Tesis de Máster en Ciencias. Universidad de Gotemburgo.

- Marchese, H. 1971.** Litoestratigrafía y variaciones faciales de las sedimentitas mesozoicas de la Cuenca Neuquina, Provincia del Neuquén, República Argentina. *Revista Asociación Geológica Argentina* 26 (3): 343-410.
- Margat J. y van der Gun, J. 2013.** *Groundwater around the World. A Geographic Synopsis.* NW, US: (Ed.) CRC Press.
- Méndez, V., Zappettini, E. y Zanettini J.C. 1995.** Geología y metalogénesis del Orógeno Andino Central, República Argentina. Secretaría de Minería. *Anales* 23: 1-190. Buenos Aires. En: Leanza, H., Repol, D., Hugo, C. y Sruoga, P., 2005. Hoja geológica 3769-31, Chorriaca, Provincia del Neuquén.
- Mosquera, A., Silvestro, J., Ramos, V.A., Alarcón, M. y Zubiri, M. 2011.** La estructura de la dorsal de huincul. En: Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O. Vallés, J. M. y Danieli, J. C. (Eds.): 18º Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 385–398.
- Pángaro, F., Pereira, D.M. y Micucci, E. 2009.** El sinrift de la dorsal de huincul, Cuenca Neuquina: evolución y control sobre la estratigrafía y estructura del área. *Revista De La Asociación Geológica Argentina.* 65(2): 265- 277.
- Pettinari, G. y S. Barredo. 1994.** Mineralogía del sector medio-superior del miembro Huincul, Fm. Río Limay, Grupo Neuquén, En Challacó, Provincia del Neuquén. IIº Reunión De Mineralogía Y Metalogenia. Publicación del Instituto de Recursos Minerales N° 3: 295-304. La Plata.
- Pettinari, G., Giusiano A. y Ludueña D. 1999.** Arcillas rojas del Grupo Neuquén. En: Zappettini, E.O. (Ed.). *Recursos Minerales de la República Argentina.* Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto De Geología y Recursos Minerales, *anales* 35: 1103 - 1112. Buenos Aires.
- Ramos, V.A. 1981.** Descripción geológica de la hoja 33c, Los Chihuidos Norte. Provincia del Neuquén. Servicio Geológico Nacional. *Boletín* 182: 1-103. Buenos Aires.
- Ramos, V., Folguera, A. y Garcia Morabito, E. 2011.** Las provincias geológicas del Neuquén. Relatorio Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. 317-326.
- Robinson, E. A. y Clark D., 2006.** *Basic Seismology 13- Huygens' principle. The Leading Edge.*
- Rodriguez, M.F., Leanza, H. y Salvarredy Aranguren, M. 2007.** Hoja Geológica 3969-II, Neuquén, Provincia del Neuquén, Río Negro y La Pampa.
- Rolleri, E.O. 1976.** Sistema de San Bárbara. En: Ramos, V., Folguera, A. y Garcia Morabito, E. 2011. Las provincias geológicas del Neuquén. Relatorio Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. 317-326.
- Schlumberger. 1989.** *Log Interpretation Principles/ Applications.* (Ed.) Schlumberger
- Silvestro, J. y Zubiri, M. 2008.** Convergencia Oblicua: Modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39°S) – Neuquén. En: Mosquera, A., Silvestro, J., Ramos, V. A., Alarcón, M. y Zubiri, M., 2011. La estructura de la dorsal de huincul. En Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O. Vallés, J. M. y Danieli, J. C. (Eds.): 18º Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 385–398.
- Spalletti, L., Franzese, J., Matheos, S., y Schwarz, E. 2000.** *Sequence stratigraphy of a tidally-dominated carbonate - siliciclastic ramp; the Tithonian of the southern Neuquen Basin, Argentina.* En: Casadío, S. y Montagna, A.O. 2015. Estratigrafía de la cuenca neuquina. En: Geología de la

Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros. Ponce J.J., Montagna A.O., Carmona, N. (editores): 9-21. 1ª Edición. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación YPF; Viedma: Universidad Nacional de Río Negro.

Stipanovic, P.N. Y F. Rodrigo, 1970. El diastrofismo Eo- y Mesocretácico en Argentina y Chile, con referencias a los Movimientos Jurásicos de la Patagonia. En: Rodríguez, M.F., Leanza, H. y Salvarredy Aranguren, M. 2007. Hoja Geológica 3969-II, Neuquén, Provincia del Neuquén, Río Negro y La Pampa.

Uliana, M.A., Dellapé D.A. y Pando G.A. 1975a. Distribución y génesis de las sedimentitas rayosianas. (Cretácico Inferior de las provincias de Neuquén y Mendoza). En: Garrido, A. C., 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales. 12. 121-177.

Uliana, M.A., Dellapé D.A. y Pando G.A. 1975b. Estratigrafía de las sedimentitas rayosianas. (Cretácico inferior de las provincias de Neuquén y Mendoza). En: Garrido, A. C., 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales. 12. 121-177.

Wonik, T. y Hinsby, K. 2006. *Borehole Logging in Hydrogeology*. En: Kirsch, R., Rumpel, H.M., Scheer, W., Wiederhold, H. (Eds.): *Groundwater resources in buried valleys - a challenge for geosciences*. Leibniz Institute for Applied Geosciences. Hannover, 107-122.

Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. y Gardner, G.H.F. 1958. *An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media: Geophysics*, 23, 459-493.

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 Recursos Naturales De La Provincia del Neuquén*, Relatorio del 18º Congreso Geológico Argentino: 205-222, Neuquén.

ANEXOS

Anexo 1. Velocidad promedio de tránsito en rocas. Comisión Nacional del Agua (2007).

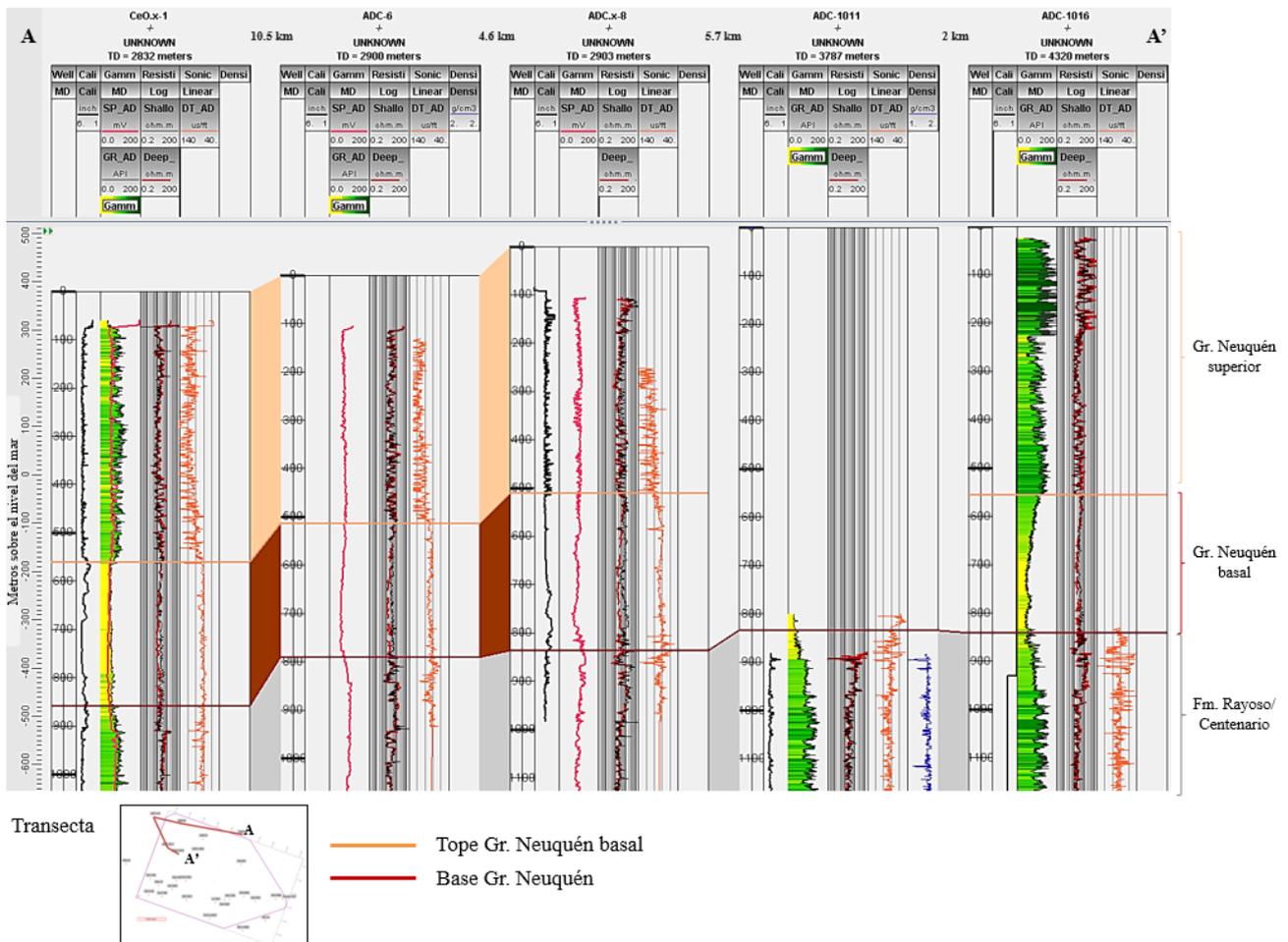
ROCA	INTERVALO ΔT_{ma} $\mu\text{s}/\text{ft}$	T_{ma} PROMEDIO
Arenisca	51.00-57.00	54.00
Caliza	45.00-50.00	47.50
Dolomita	40.00-45.00	43.50
Anhidrita	-	50.00
Halita	-	66.70
Lutita	-	>110.00
(Sin consolidar)	-	100.00
(Normal)	-	< 90.00
(Consolidada)	-	
Yeso	-	52.50
Dunita	34.70-41.00	38.20
Diabasa	44.00-46.00	44.60
Gabro	42.20-47.60	42.40
Granito	-	50.80
Granodiorita	-	69.00
Serpentina	-	53.90
Basalto	50.00-65.00	-
Cemento	83.30-95.00	-
Concreto	83.00-125.00	-
Acero	-	57.10
Agua dulce	-	200.00

Anexo 2. Profundidad (medida en metros bajo boca de pozo) de los límites identificados en cada pozo.

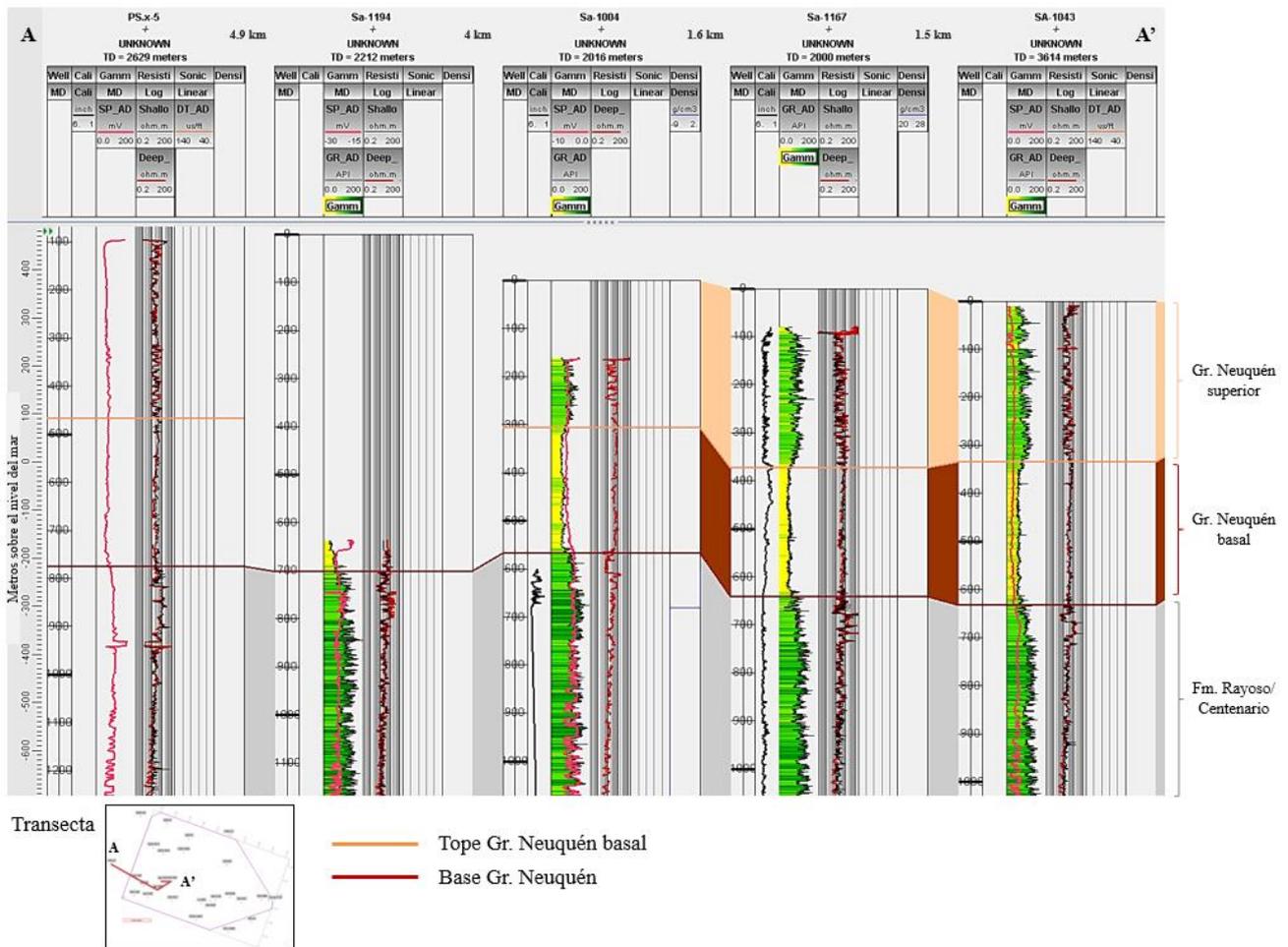
	Pozo	Profundidad (mbbp)	
		Base Gr. Neuquén	Tope Gr. Neuquén basal
1	ADC.x-8	836.0	511.6
2	ADC-1011	833.6	
3	ADC-1016	841.8	555.7
4	ADC-5	767.2	462.2
5	ADC-6	790.5	513.0
6	Ce.x-1114	730.2	409.3
7	Ce.xp-1116	634.8	
8	CE-037	702.8	379.3
9	CeO.x-1	858.7	560.7
10	Li-1001	585.3	310.7
11	PS.x-5	800.7	459.9
12	RL.x-1002	542.8	274.5
13	RL.x-2	523.8	235.6
14	RLE.x-2001	508.1	184.6
15	SA-0002	614.2	336.8
16	SA-1004	555.0	314.9
17	SA-1021	691.0	381.9
18	SA-1043	632.4	334.0
19	SA-1069	630.4	
20	SA-1097	626.7	357.1
21	Sa-1122	616.3	
22	SA-1125	717.8	472.0
23	SA-1160	556.5	
24	SA-1167	641.8	372.7
25	SA-1194	702.0	
26	SC-1011	588.8	299.2
27	SN.x-3	615.8	363.4

Anexo 3. Correlación de pozos a partir de perfiles eléctricos.

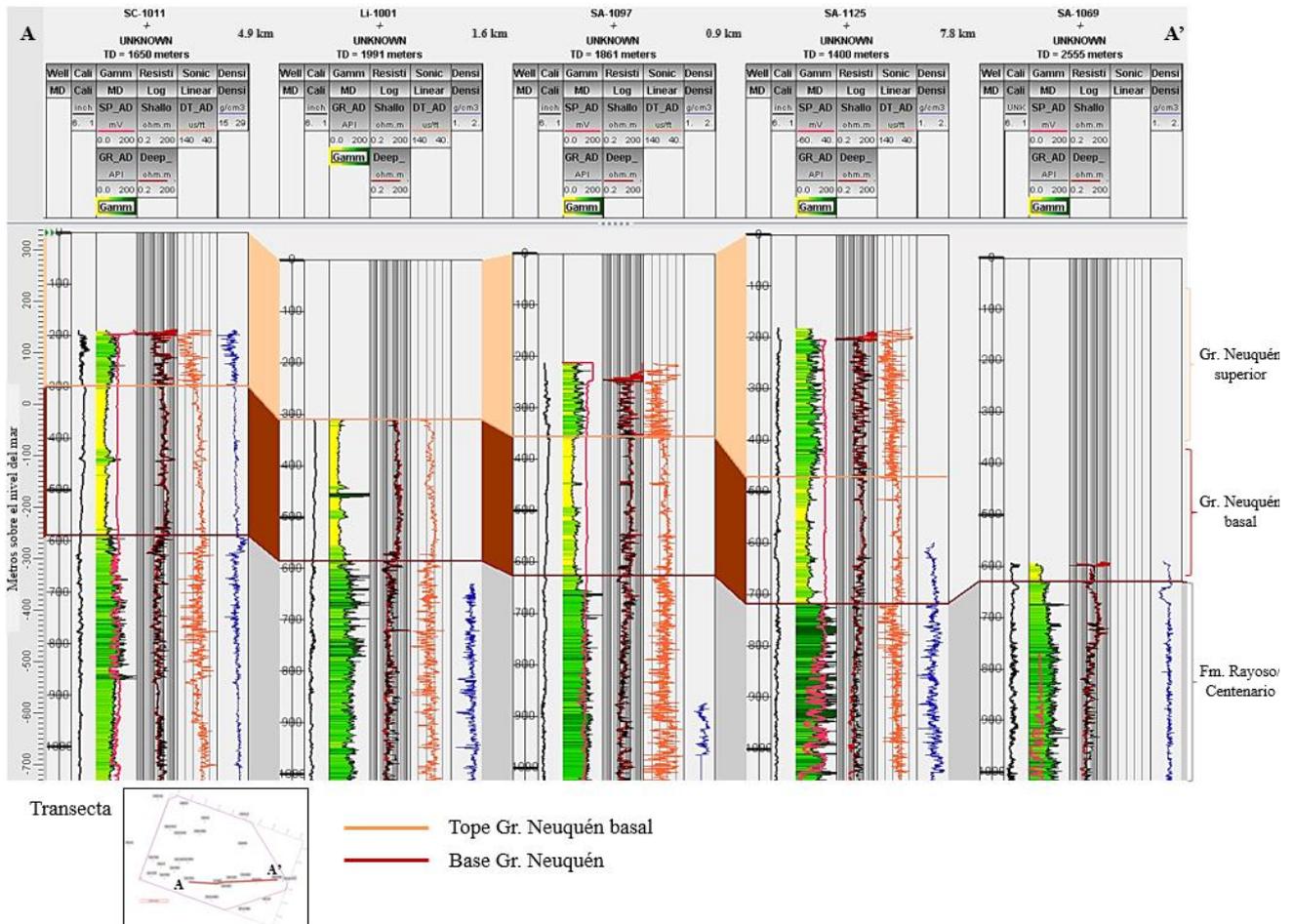
- Transecta al norte/ noreste. Secuencias interpretadas y correlacionadas en el intervalo de interés en el área Agua del Cajón. En las pistas se observa, de izquierda a derecha: profundidad en el pozo en metros (pista 1), registro caliper (pista 2), registro de GR y SP (pista 3), registro de resistividad (pista 4), registro sísmico (pista 5) y registro de densidad (pista 6).



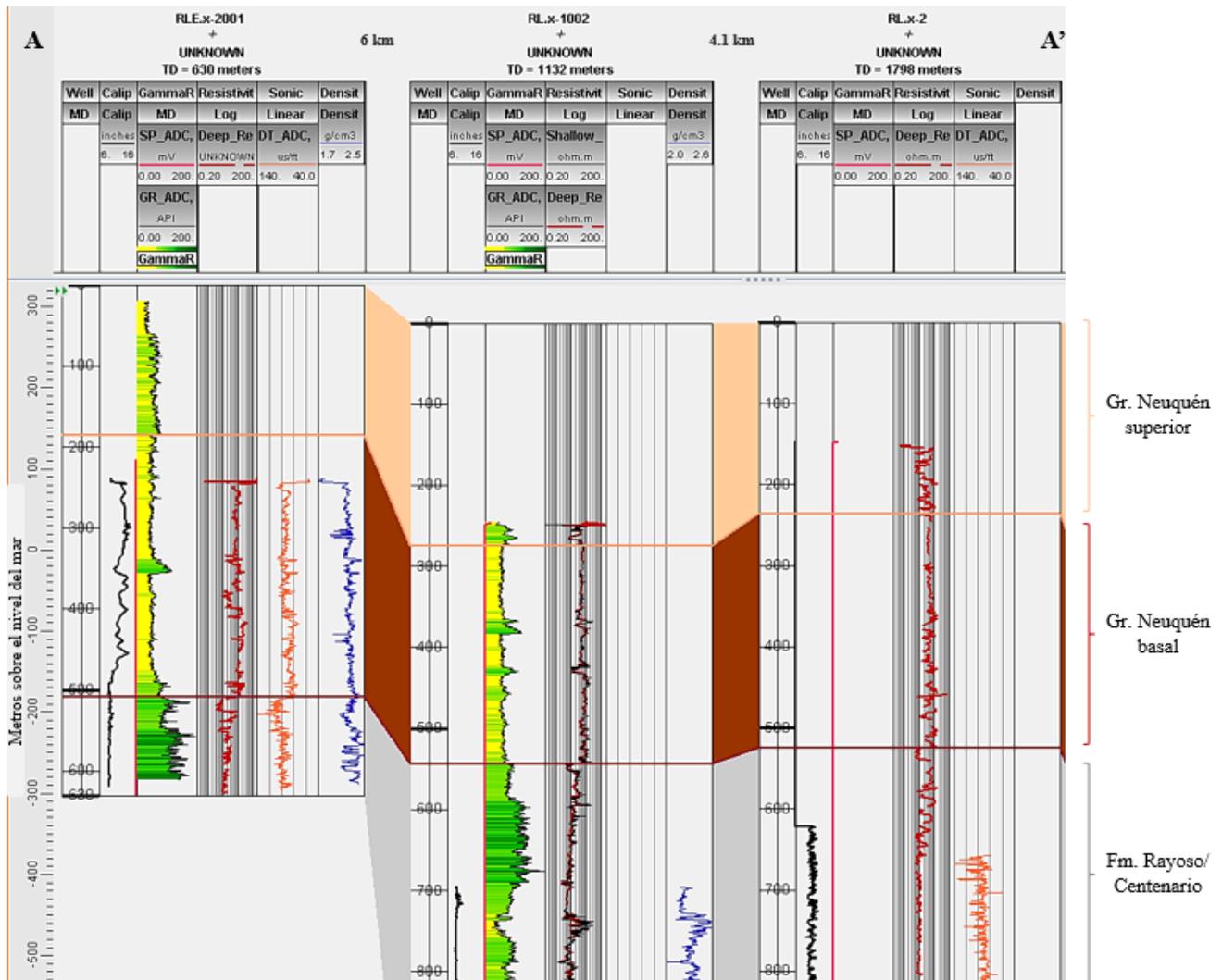
- Transecta al este-centro. Secuencias interpretadas y correlacionadas en el intervalo de interés en el área Agua del Cajón. En las pistas se observa, de izquierda a derecha: profundidad en el pozo en metros (pista 1), registro caliper (pista 2), registro de GR y SP (pista 3), registro de resistividad (pista 4), registro sísmico (pista 5) y registro de densidad (pista 6).



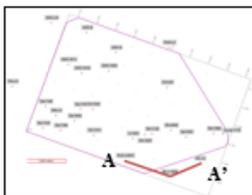
- Transecta centro/ centro-oeste. Secuencias interpretadas y correlacionadas en el intervalo de interés en el área Agua del Cajón. En las pistas se observa, de izquierda a derecha: profundidad en el pozo en metros (pista 1), registro caliper (pista 2), registro de GR y SP (pista 3), registro de resistividad (pista 4), registro sísmico (pista 5) y registro de densidad (pista 6).



- Transecta al suroeste. Secuencias interpretadas y correlacionadas en el intervalo de interés en el área Agua del Cajón. En las pistas se observa, de izquierda a derecha: profundidad en el pozo en metros (pista 1), registro caliper (pista 2), registro de GR y SP (pista 3), registro de resistividad (pista 4), registro sísmico (pista 5) y registro de densidad (pista 6).



Transecta



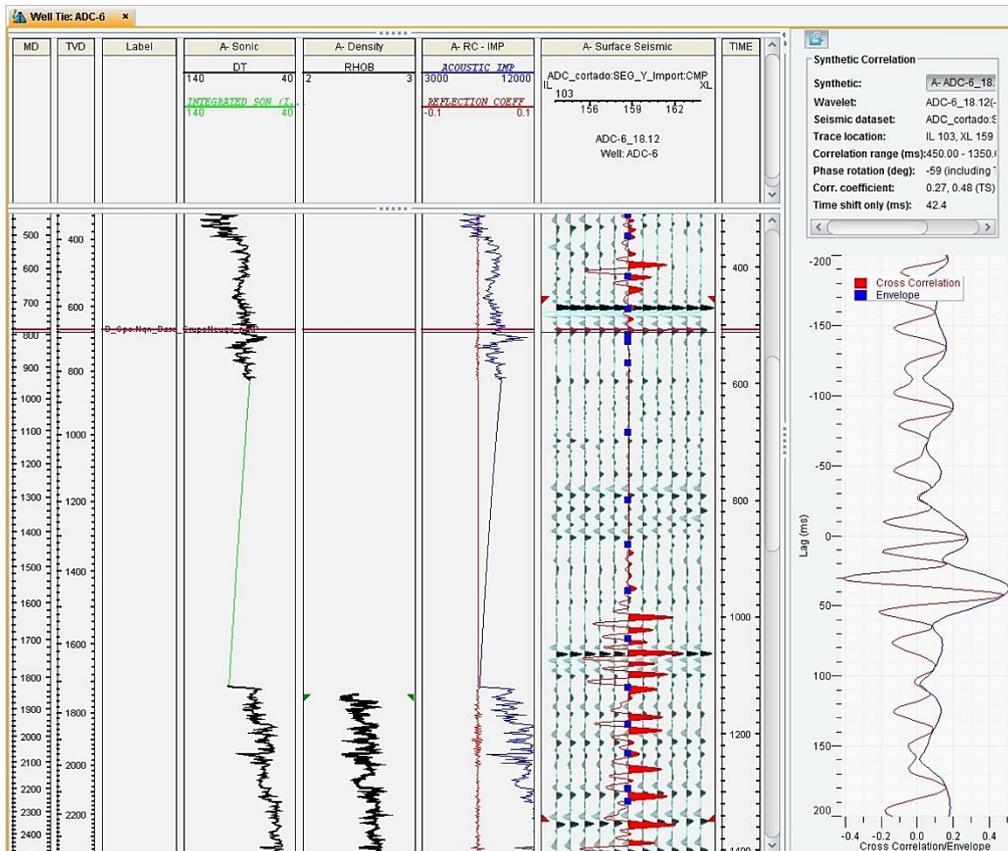
- Tope Gr. Neuquén basal
- Base Gr. Neuquén

Anexo 4. Clasificación hidrogeológica de los acuíferos en base al tipo de litología. Custodio y Llamas (1983).

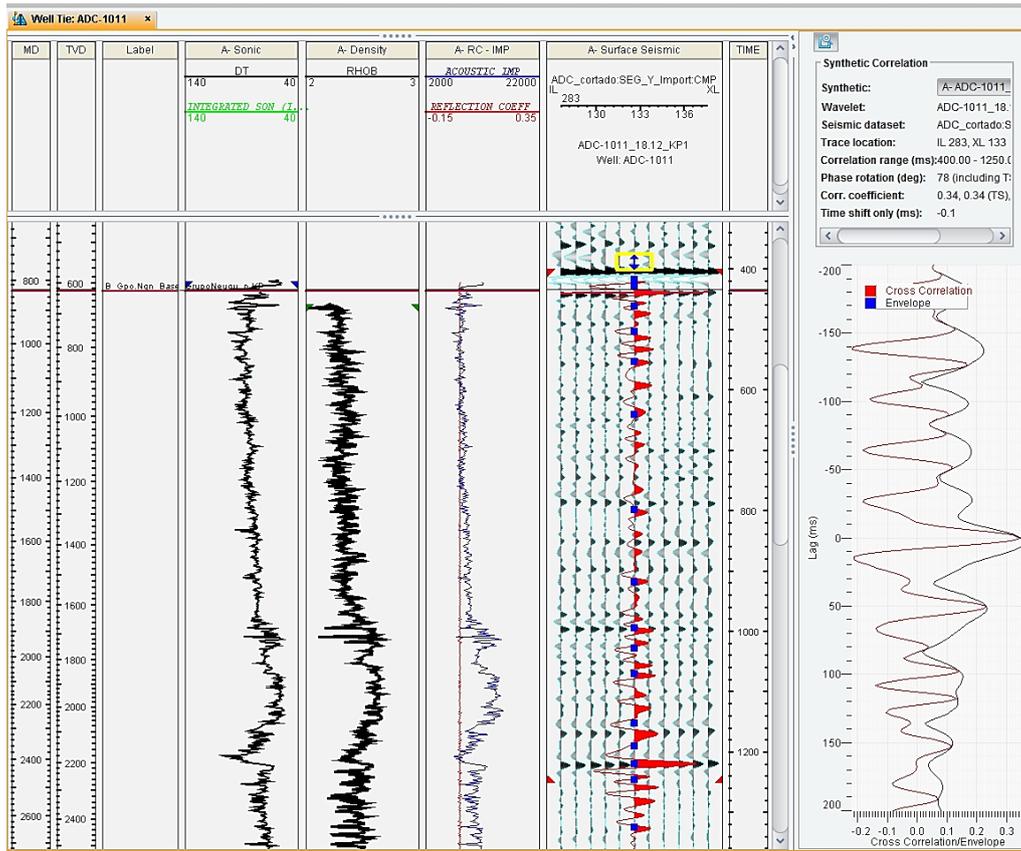
Permeabilidad (m/día)	10 ⁴	10 ³	10 ²	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia; mezcla de grava y arena		Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas			Arcillas no meteorizadas			
Calificación	Buenos acuíferos				Acuíferos pobres				Impermeables		
Capacidad de drenaje	Drenan bien				Drenan mal				No drenan		

Anexo 5. Correlación pozos-sísmica.

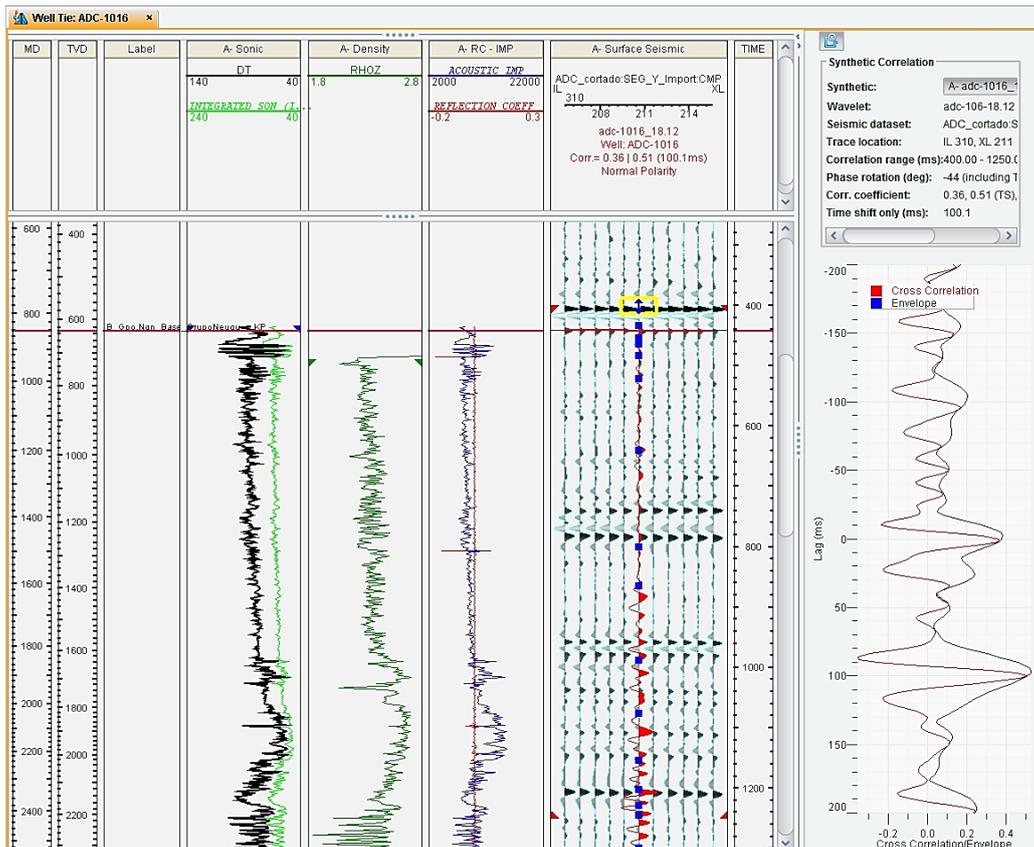
- Pozo ADC.a-6



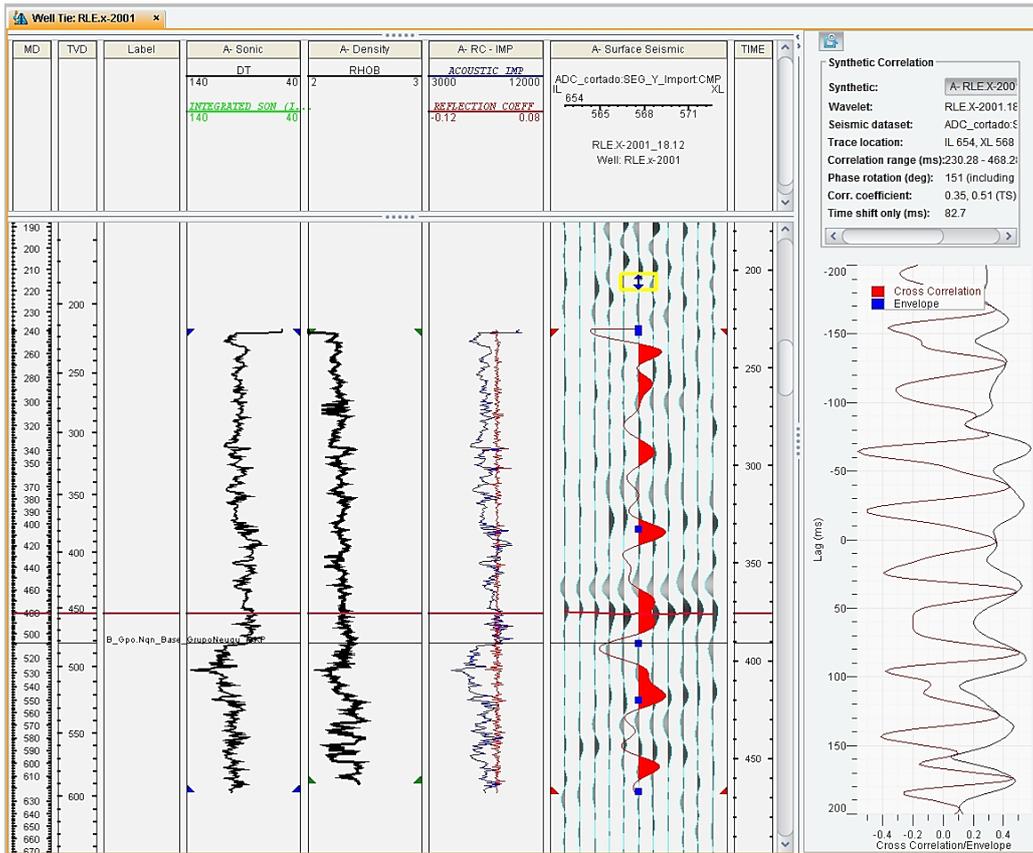
- Pozo ADC-1011



- Pozo ADC-1016



- Pozo RLE.x-2011



- Pozo Ce.xp-1116

