

Universidad Nacional del Comahue
Faculta de Ingeniería
Departamento de Geología y Petróleo



Trabajo Final de Licenciatura

**Análisis petrofísico y geoquímico de interés hidrogeológico
en la zona sur del Dorso de los Chihuidos y llanura aluvial
del río Neuquén.**

Autor: Lucas Emiliano Fidel

Director: Geol. José Luis Vedia

Co-Directora: Dra. Cecilia Dufilho

-2023-

Universidad Nacional del Comahue – Facultad de Ingeniería

Lic. en Ciencias Geológicas – Dpto. de Geología y Petróleo

Análisis petrofísico y geoquímico de interés hidrogeológico en la zona sur del Dorso de los Chihuidos y llanura aluvial del río Neuquén.

Trabajo Final de Licenciatura presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue como parte de los requisitos para obtener el título de:

LICENCIADO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Autor: Lucas Emiliano Fidel – Legajo: ING – 2306

Director: Geol. José Luis Vedia.

Co-Directora: Dra. Cecilia Dufilho – Cátedra de Hidrogeología. Departamento de Geología y Petróleo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.

Jurado 1: Lic. Magalí Alonso

Jurado 2: Lic. Nicolás Carrizo

Jurado 3: Geol. María Isabel Sgrilletti

Neuquén Capital, Argentina.

Año 2023

AGRADECIMIENTOS

A mis papas y mi hermano, por confiar en mi proceso y darme el apoyo incondicional pese a las idas y venidas durante este largo período.

A mis amigos de toda la vida, y los que conocí gracias a la universidad, mis queridos “geoamigos”. Fueron un soporte fundamental en los momentos más difíciles, junto con mi familia.

A José y Cecilia por compartir sus conocimientos, paciencia y su tiempo para guiarme en el proceso final de mi etapa universitaria.

A José y Karen por las largas jornadas de estudio en su casa, acompañados siempre de una gran comida.

Al jurado evaluador de este trabajo.

A mi país por darme la oportunidad de estudiar en la universidad pública.

A la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia de Neuquén por brindarme los datos de pozos necesarios para realizar este trabajo.

A las empresas que aportaron información de pozos y análisis de muestras de agua.

A Boni Boni por poner su mejor cara y cambiarme el humor con alguna gracia o paseo en días cargados de estudio y trabajo.

A todos los profesores de la carrera.

A todas las personas que en algún momento me acompañaron en esta etapa.

CONTENIDO:

1	RESUMEN	1
2	ABSTRACT	2
3	INTRODUCCION	3
4	OBJETIVOS	3
5	AREA DE ESTUDIO	4
5.1	<i>Ubicación y vías de acceso</i>	4
6	ANTECEDENTES	5
7	METODOLOGIA DE TRABAJO	7
8	CARACTERISTICAS GEOGRAFICAS GENERALES	8
8.1	<i>Características Hidrogeológicas</i>	8
8.1.1	Clima	8
8.1.2	Suelo y vegetación	8
9	GEOLOGIA	9
9.1	<i>Faja plegada y corrida del Agrio (FPC)</i>	11
9.2	<i>Dorso de los Chihuidos (DCh)</i>	12
9.3	<i>Dorsal de Huincul</i>	13
9.4	<i>Estratigrafía</i>	17
9.4.1	Formación Mulichinco	17
9.4.2	Formación Agrio	17
9.4.3	Formación Huitrín.....	18
9.4.4	Formación Rayoso	19
9.4.5	Grupo Neuquén	21
9.4.6	(Subgrupo Río Limay).....	21
10	REGISTROS DE POZO	23
10.1	<i>Registros directos</i>	23
10.1.1	Perfil Litológico por recortes de roca (cutting)	23
10.2	<i>Registros indirectos</i>	24
10.2.1	Registros eléctricos	24
11	PASES Y CARACTERISTICAS DE LAS FORMACIONES EN LOS REGISTROS ELECTRICOS	29
11.1	<i>Pozos Seleccionados</i>	29
11.2	<i>Pozos seleccionados para mapear profundidades y espesores de las unidades geológicas observadas</i>	30
11.3	<i>Pases y características de las formaciones en los registros eléctricos</i>	31

11.3.1	Formación Mulichinco.....	31
11.3.2	Formación Agrio.....	31
11.3.3	Formación Huitrín.....	32
11.3.4	Formación Rayoso.....	33
11.3.5	Grupo Neuquén (Subgrupo Río Limay).....	35
11.4	<i>Transectas</i>	36
11.4.1	Transecta A-A'.....	37
11.4.2	Transecta B-B'.....	38
11.4.3	Transecta C-C'.....	39
11.4.4	Transecta D-D'.....	41
11.4.5	Transecta E-E'.....	43
11.5	<i>Mapas Estructurales</i>	45
11.5.1	Tope de la Formación Mulichinco.....	45
11.5.2	Tope de la Formación Agrio.....	46
11.5.3	Tope de la Formación Huitrín.....	47
11.5.4	Tope de la Formación Rayoso.....	48
11.5.5	Tope del Grupo Neuquén (Subgrupo Río Limay).....	49
11.6	<i>Mapas isopáquicos</i>	50
11.6.1	Formación Agrio.....	50
11.6.2	Formación Huitrín.....	51
11.6.3	Formación Rayoso.....	52
11.6.4	Grupo Neuquén.....	53
12	UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	54
12.1	<i>Conceptos básicos</i>	54
12.1.1	Hidrología de aguas subterráneas.....	54
12.1.2	Clasificación de unidades geológicas según su comportamiento hidrogeológico.....	54
12.1.3	Clasificación de acuíferos según su comportamiento hidráulico.....	55
13	PETROFISICA DE AGUAS SUBTERRANEAS	55
13.1	<i>Porosidad (\emptyset)</i>	55
13.1.1	Porosidad efectiva, rendimiento específico y retención específica.....	56
13.2	<i>Saturación de agua (SW)</i>	58
13.3	<i>Permeabilidad o conductividad hidráulica</i>	58
13.4	<i>Volumen de arcillas (Vol.arc)</i>	59
13.4.1	Cálculo estimativo de volumen de arcillas.....	59
13.5	<i>Resistividad</i>	60
13.5.1	Resistividad de la formación (Rt).....	60
13.5.2	Resistividad del agua de formación (Rw).....	60
13.6	<i>Cálculo de parámetros hidrogeológicos</i>	61
13.6.1	Espesor.....	61
13.6.2	Volumen de arcillas (Vol.arc).....	61
13.6.3	Porosidad calculada con perfil Sónico.....	61
13.6.4	Salinidad.....	62
13.6.5	Estimación de valor límite de resistividad por el método de Archie (1942).....	62

14	CARACTERIZACION DE UNIDADES HIDROGEOLOGICAS EN EL AREA DE ESTUDIO	65
14.1	<i>Criterios para la identificación de unidades hidrogeológicas acuíferas.....</i>	65
14.2	<i>Caracterización y cartografía des hidrogeológicas acuíferas</i>	66
14.2.1	Unidad hidrogeológica acuífera inferior de la Formación Rayoso (UHAIR)	67
14.2.2	Unidad Hidrogeológica Acuífera Superior de la Formación Rayoso (UHASR)	76
14.2.3	Unidad Hidrogeológica del Grupo Neuquén (UHAN)	85
15	CALIDAD DEL AGUA	94
15.1	<i>Agua dulce</i>	94
15.1.1	Componentes mayoritarios (mayor a 5 mg/L)	94
15.1.2	Componentes minoritarios (menor a 5 mg/L).....	94
15.2	<i>Agua potable.....</i>	94
15.2.1	Características físicas	95
15.2.2	Características químicas:.....	95
15.2.3	Sustancias inorgánicas	95
15.2.4	Contaminantes orgánicos:.....	96
15.3	<i>Evolución del agua</i>	96
15.4	<i>Diagramas de representación de las características químicas del agua.....</i>	97
15.4.1	Diagrama de Stiff	97
15.4.2	Diagrama de Piper-Hill- Langelier.....	98
15.5	<i>Resultados de los análisis hidroquímicos de muestras de agua disponibles.....</i>	99
15.5.1	Diagramas de Stiff	101
15.5.2	Diagrama de Piper-Hill-Langelier.....	104
16	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
17	BIBLIOGRAFÍA.....	108

1 RESUMEN

El trabajo se centra en contribuir al conocimiento de los recursos hídricos subterráneos en el centro de la provincia de Neuquén donde las precipitaciones medias anuales no superan los 150-200 mm (Pereyra et al. 2011), convirtiendo al agua subterránea en la principal fuente de este recurso en zonas alejadas de cauces permanentes como lo son el río Neuquén o el Colorado.

En este estudio se analizaron e interpretaron perfiles eléctricos de pozos junto con recortes de perforación y muestras de agua en la zona sur del Dorso de los Chihuidos, parte del este de la faja plegada y corrida del Agrio, y una porción de la llanura aluvial del río Neuquén al norte de la Dorsal de Huincul.

Se procesaron los registros eléctricos de 25 pozos petroleros proporcionados por la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la Provincia de Neuquén (SEMH) y operadoras locales. Mediante la interpretación, en el *software* Petrel 2017.4, de perfiles de rayos gamma, resistividad, tiempo de tránsito (sónico) y datos de control geológico, se determinaron los pases formacionales en subsuelo y se realizaron mapas estructurales e isopáquicos de las formaciones identificadas. El *software* también fue utilizado para calcular parámetros petrofísicos que sirvieron para identificar y mapear características petrofísicas de interés hidrogeológico, con las que se definieron tres unidades hidrogeológicas acuíferas.

Dentro de los parámetros petrofísicos calculados se encuentran: volumen de arcillas, porosidad y salinidad.

Se estimó la permeabilidad o conductividad hidráulica según el tipo de litología involucrada a partir de la tabla propuesta por Benítez (1963) en Custodio y Llamas (1983).

Las unidades acuíferas identificadas se localizaron en estratos de la Fm. Rayoso y Gr. Neuquén. Se describieron dos unidades dentro de Fm. Rayoso y una en el Gr. Neuquén.

A la unidad hidrogeológica más profunda dentro de la Fm. Rayoso se la denominó Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso (UHAI) la cual se encuentra entre los 327 y 630 metros de profundidad referido al nivel del terreno. La porosidad total promedio calculada fue de 20.97%, el volumen de arcillas promedio de 24.72%, la salinidad promedio 10517 ppm eq. NaCl y la resistividad promedio 45.19 Ohm.m.

Debajo de la Fm. Candeleros se describió a la Unidad Hidrogeológica Acuífera Superior de la Formación Rayoso (UHASR) que se encuentra a profundidades de entre 133 y 449 m. La porosidad total promedio calculada fue de 27.81%, el volumen de arcillas promedio de 21%, la salinidad promedio 4105 ppm eq. NaCl y la resistividad promedio 57.52 Ohm.m.

Al sureste del área de estudio, entre la parte superior de la Fm. Candeleros y la columna sedimentaria de la Fm. Huincul, se describió a la Unidad Hidrogeológica Acuífera del Grupo Neuquén (UHAN). Se ubica a profundidades de entre 20.48 y 152 m. La porosidad total promedio calculada fue de 33.53%, el volumen de arcillas promedio de 14.14%, la salinidad promedio 4056 ppm eq. NaCl y la resistividad promedio 50.3 Ohm.m.

Se realizaron diagramas de clasificación de aguas de Stiff (1951) y Piper-Hill-Langelier (1944) a partir del procesamiento de 14 muestras de aguas extraídas de 4 pozos petroleros ubicados al este

del área de estudio. Los resultados indicaron que las muestras de aguas más cercanas al cauce del río Neuquén son del tipo carbonatadas sódicas y mientras que las más alejadas del río son del tipo cloruradas y sulfatadas sódicas, indicando una evolución progresiva del agua subterránea al aumentar la distancia al río Neuquén.

2 ABSTRACT

The work focuses on contributing to the knowledge of groundwater resources in the center of the province of Neuquén where the average annual rainfall does not exceed 150-200 mm, making underground water the main source of this resource in areas that are far from permanent watercourse like Neuquén or Colorado rivers.

In this study, electrical well logs were analyzed and interpreted along with drill cuttings and water samples in the southern zone of Dorso de los Chihuidos, eastern part of Agrio folded and thrust belt, and a portion of the alluvial plain of Neuquén river to the north of the Huincul Ridge.

25 electrical well records provided by the Undersecretary of Hydrocarbons and local operators were processed. Through the interpretation, in Petrel 2017.4 *software*, of well logs of gamma ray, resistivity, transit time (sonic) and geological control data, formation tops were determined and structural and isopachic maps of the identified formations were made. The *software* was also used to calculate petrophysical parameters that were used to identify and map petrophysical features of hydrological interest with which three aquifer hydrological units were defined.

Among the petrophysical parameters calculated are volume of clays, porosity and salinity.

The permeability or hydraulic conductivity was estimated according to the type of lithology involved from the table proposed by Benítez (1963) in Custodio and Llamas (1983).

The identified aquifer units were located in strata of the Rayoso Formation and Neuquén Group. Two units were described within Rayoso and one in Neuquén Group.

The deepest hydrogeological unit within Rayoso was called the Lower Aquifer Hydrogeological Unit of the Rayoso Formation (UHAIR) which is between 327 and 630 meters deep. The calculated average porosity was 20.97%, the average clay volume 24.72%, the average salinity 10517 ppm eq. NaCl and the average resistivity 45.19 Ohm.m.

Under Candeleros Formation the Upper Aquifer Hydrogeological Unit of the Rayoso Formation (UHASR) was described, which lies at depths between 133 and 449 m. The calculated average total porosity was 27.81%, the average clay volume 21%, the average salinity 4105 ppm eq. NaCl and the average resistivity 57.52 Ohm.m.

To the southeast of the study area, between the upper part of Candeleros Formation and the sedimentary column of Huincul Formation, the Aquifer Hydrogeological Unit of the Neuquén Group (UHAN) was described. It is located at depths between 20.48 and 152 m. The calculated average total porosity was 33.53%, the average clay volume 14.14%, the average salinity 4056 ppm eq. NaCl and the average resistivity 50.3 Ohm.m.

Stiff and Piper-Hill-Langelier diagrams were made by processing a total of 14 water samples from 4 oil wells located to the east of the studied region. The results indicated that the water samples closest to the Neuquén river stream are sodium carbonate type while those furthest away from the river are sodium chloride and sulfate type, indicating a progressive evolution of groundwater as the distance to the Neuquén river increases.

3 INTRODUCCION

El agua subterránea en la cuenca Neuquina es esencial para la vida y las actividades económicas de la región. En zonas áridas donde las corrientes de agua superficiales se encuentran alejadas, y la falta de precipitaciones en la zona es muy elevada, los acuíferos subterráneos son una fuente vital de agua dulce.

La región sur del Dorso de los Chiuidos y la parte distal de la llanura aluvial del río Neuquén se ubican en el centro del Engolfamiento Neuquino, donde las precipitaciones medias anuales no superan los 150-200 mm. En esta región existe un aumento generalizado de la exploración y explotación de hidrocarburos lo que hace que encontrar recursos hídricos subterráneos sea fundamental no solo para la propia industria sino también para pobladores que viven en localidades aledañas. Para esto se pueden aprovechar los perfiles eléctricos generados durante la perforación de hidrocarburos con el objetivo de identificar y caracterizar unidades acuíferas útiles para diversas tareas. Este trabajo busca aportar información sobre acuíferos en la zona.

4 OBJETIVOS

- Identificar y caracterizar niveles acuíferos confinados o semiconfinados entre capas impermeables, dentro de las unidades estratigráficas del Grupo Neuquén y Formación Rayoso.
- Determinar la calidad del agua contenida en los acuíferos identificados.

Para alcanzar estas metas fue necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Análisis e interpretación de las unidades estratigráficas en el subsuelo.
- La identificación de capas acuíferas y sus sellos mediante los análisis de las propiedades petrofísicas a partir de registros eléctricos junto con las descripciones litológicas de pozos.
- Análisis de la calidad del agua de las unidades reconocidas como posibles acuíferos. La regionalización de los niveles identificados mediante correlación de pozos.
- Cartografiar las unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio.
- Generar diagramas de Stiff y Piper-Hill- Langelier para conocer acerca de la evolución del agua subterránea.

5 AREA DE ESTUDIO

5.1 Ubicación y vías de acceso

El área de estudio está localizada en la región central de la Provincia del Neuquén a unos 30 km al oeste de la localidad de Sauzal Bonito (figura 1), se emplaza en una superficie aproximada de 2700 km² inmediatamente al sureste del poblado Quilil Malal. Las principales vías de acceso son las rutas provinciales número 1 y 10. Los márgenes del área de estudio fueron establecidos a partir de la ubicación de pozos periféricos con respecto a la mayor concentración de pozos con información. El borde oriental coincide aproximadamente con el límite del flanco este del Dorso de los Chihuidos, mientras que el borde occidental se ajusta con las coordenadas de la localidad de Quilil Malal. El margen norte se establece sobre el pozo PH-a el cual se localiza al norte de Quilil Malal. El margen sur se localiza en el pozo P-a ubicado al sur oeste de Sauzal Bonito. La región central del área de estudio se encuentra atravesada de noroeste a sureste por el río Neuquén.

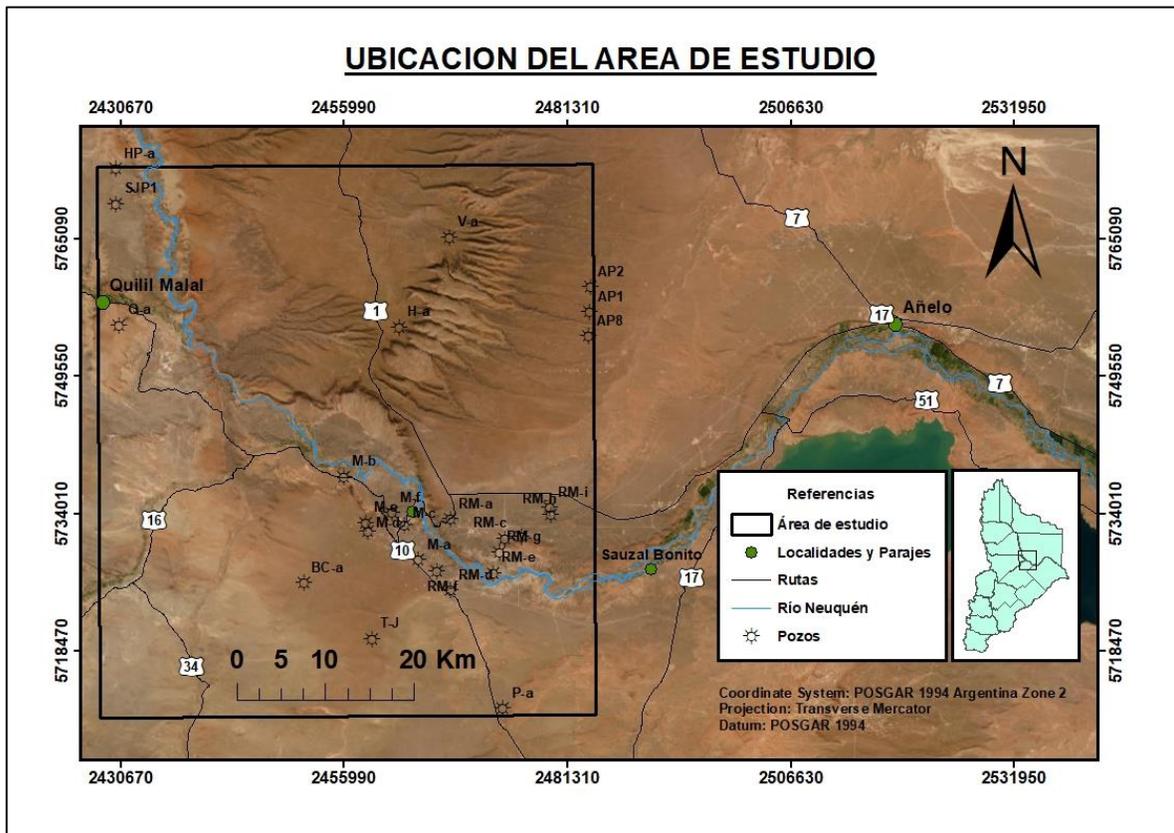


Figura 1: Ubicación geográfica del área de estudio.

6 ANTECEDENTES

Los antecedentes recopilados para el desarrollo del presente trabajo se enfocan en investigaciones hidrogeológicas de la región cuyos objetivos fueron interpretar propiedades físicas de las rocas y determinar la calidad del agua que contienen.

Lamentablemente los trabajos de investigación realizados por operadoras de hidrocarburos en relación al uso de perfiles eléctricos durante perforaciones para la detección y caracterización de niveles acuíferos a proteger, generalmente, no son de acceso público debido a que los mismos suelen ser de carácter confidencial o semiconfidencial. En este estudio se mencionan artículos académicos que fundamentan la aplicación de registros eléctricos de pozos hidrocarburíferos en investigaciones hidrogeológicas.

Keys (1968), en su trabajo sobre registros de pozo en aguas subterráneas destaca la importancia y practicidad de aprovechar los equipos y técnicas de interpretación que se utilizan en la industria petrolera, tales como los registros de potencial espontáneo, resistividad, rayos gamma, de neutrones, sónico y diámetro del pozo entre otros para investigaciones hidrogeológicas. También resalta la necesidad de reducir el gasto en equipos y servicios, puesto que afortunadamente la mayor parte de los pozos de agua no son tan profundos como los de petróleo y las temperaturas y presiones son más bajas.

Mendel y Shiftan (1981), en su libro de investigación y desarrollo de recursos de aguas subterráneas, señalan la necesidad de contar con personal especializado en interpretación y técnicas de perfilaje en relación a la prospección de aguas subterráneas. Esto se debe a los altos costos que supondría aplicar las mismas técnicas utilizadas para la detección de hidrocarburos, a profundidades menores de 200 metros.

Mediante la interpretación de registros eléctricos (resistividad, rayos gamma y sónico) Alonso (2016) en su trabajo final de licenciatura define a la Fm. Rayoso como la principal contenedora de unidades acuíferas en la región del Dorso de los Chihuidos entre los 200 y 500 mbbp, disminuyendo su importancia hacia el este en el bajo de Añelo, donde los mayores niveles potencialmente acuíferos pertenecen a unidades dentro del Gr. Neuquén.

Bertoni y Dufilho (2016), a través del análisis muestras de agua a 5 m de profundidad en las localidades de Añelo, San Patricio del Chañar y Sauzal Bonito, concluyeron que el agua subterránea de los acuíferos de la planicie aluvial del río Neuquén y Colorado presenta una baja mineralización de tipo bicarbonatada a carbonatada cálcica y magnésica, fuertemente relacionada con el río Neuquén en asociación con un bajo tiempo de residencia en el acuífero.

En el trabajo mencionado anteriormente, las muestras de agua analizadas de perforaciones de rocas del Grupo Neuquén presentaron una mineralización media a elevada, predominantemente cloruradas sódicas y potásicas, y sulfatadas sódicas debido a un elevado tiempo de residencia y circulación entre estratos arcillosos que podrían aportar iones de sodio al agua.

Meconi (2015) propone un modelo hidrogeológico denominado “Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso” (SANeRa) ubicado entre el área del Dorso de los Chihuidos, la sierra Auca Mahuida, el Río Neuquén y el Bajo de Añelo. Para su objetivo, además de utilizar salinidades

determinadas a partir de perfiles eléctricos, emplea la lectura del registro combinado densidad-neutrón para fijar el nivel piezométrico entre 300 y 350 m.s.n.m. Con estas interpretaciones, en conjunto con ensayos de bombeo y análisis químicos, el autor concluye que en el área del Dorso de los Chihuidos las reservas de agua de baja salinidad existen siempre y cuando el nivel piezométrico se encuentre por encima de Rayoso clástico (Legarreta & Boll 1982). Por otra parte determina que las reservas de agua menos profundas del Dorso de los Chihuidos, dentro de la Formación Candeleros, corresponden a acuíferos colgados temporales que descargan agua en vertientes de la zona.

En su tesis doctoral Laurencena (2015), centrada en las llanuras aluviales del río Limay, identificó a partir de la interpretación de perfiles de pozos petroleros y hasta una profundidad de 500 m, cuatro unidades acuíferas que se desarrollan entre una base de baja permeabilidad y las unidades más próximas a la superficie del Gr. Neuquén. El trabajo también aborda las condiciones de recarga de dichas unidades y su composición química.

Reynaldi et al. (2020) realizaron un estudio hidrogeológico integral a partir de registros de pozo y datos de análisis químico en el bloque petrolífero “La Calera”, ubicado en la subcuenca del Bajo de Añelo, con el objetivo de determinar espesores mínimos de aislación de acuíferos. En la zona determinaron que las unidades potencialmente acuíferas se encuentran dentro de la Fm. Rayoso y Gr. Neuquén. En el mismo se establece que la base de la Formación Candeleros funciona como sello regional o acuícludo mientras que la Fm. Rayoso tiene un comportamiento de acuitardo. Los análisis químicos de muestras de agua arrojan salinidades altas clasificándolas en cloruradas y/o sulfatadas sódicas.

Del Prete (2019) reconoció cuatro grupos hidrogeoquímicos a partir de análisis químicos de muestras de aguas subterráneas en vertientes de la Fm. Candeleros y perforaciones en la parte alta y al este del Dorso de los Chihuidos. Los grupos I y II, ubicados en el sector alto del dorso, son aguas sulfatadas sódicas y sulfatadas mixtas (bicarbonatadas sódicas y sódico-cálcicas). El grupo III, al este de la estructura representa aguas bicarbonatadas mixtas (sódicas y sódico- cálcicas) a una profundidad de 88 a 354 mbbp. Por último el grupo IV, también ubicado al este del dorso pero a profundidades entre 200 y 457 mbbp, arrojó como resultado aguas clasificadas como cloruradas mixtas (sódicas y bicarbonatadas sódicas).

7 METODOLOGIA DE TRABAJO

El trabajo fue en su totalidad tarea de gabinete, a través de *softwares* autorizados.

Se utilizaron imágenes satelitales sobrepuestas con la Hoja Geológica Zapala 3969-I para reconocer los afloramientos de la zona de estudio, con el fin de determinar las unidades litoestratigráficas superficiales.

Para ilustrar la ubicación del área de estudio, ubicación de pozos, transectas y diagramas de clasificación de aguas se utilizó el *software* Arc.Gis 10.5, la cual permite integrar información georreferenciada para generar mapas.

El procesamiento de datos de pozos (perfiles eléctricos y control geológico) se logró a partir del *software* Petrel 2017.4, en el cual se integró toda la información de subsuelo disponible.

Las tareas realizadas a partir de los *softwares* fueron:

- Establecer y correlacionar los pases formacionales entre los pozos utilizados.
- Generar transectas que permitieron visualizar parámetros petrofísicos del subsuelo, espesores y estructuras en secciones transversales.
- Confeccionar mapas isopáquicos y estructurales de las unidades litoestratigráficas identificadas.
- Realizar los cálculos necesarios para establecer criterios que sirvieron para identificar unidades hidrogeológicas acuíferas.
- De las unidades hidrogeológicas acuíferas se realizaron los siguientes mapas:
 - Estructural (tope y base en m.s.n.m.).
 - Profundidades desde superficie.
 - Isopáquicos.
 - Propiedades petrofísicas: porosidad, salinidad, volumen de arcillas y resistividad.

Los estudios geoquímicos de muestras de aguas fueron procesados con el *software* Diagramme 5.4, con el que se realizaron diagramas de Piper-Hill-Langelier y Stiff para conocer los tipos de agua subterráneas en área de estudio.

8 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS GENERALES

8.1 Características Hidrogeológicas

El Dorso de los Chihuidos es considerada una zona de recarga para los acuíferos de la región extraandina de la provincia de Neuquén (Gatica, 2017) donde las reservas importantes de aguas subterráneas se localizan en sedimentitas de edad Cretácica de las Formaciones Rayoso y Candeleros. La recarga de estos acuíferos se atribuye al aporte de agua alóctona (por deshielo de los Andes) del río Neuquén (Meconi 2016) y a precipitaciones en el Dorso, volcán Auca Mahuida y la zona de la Sierra Negra según Gatica (2017).

8.1.1 *Clima*

Ubicada en el sector central de la provincia de Neuquén el área de trabajo se caracteriza por tener un clima árido y semiárido, con una precipitación media anual de 150-200 mm, predominantemente frío con temperaturas medias de entre 12 y 18°C (Pereyra et al. 2011).

8.1.2 *Suelo y vegetación*

La zona de estudio es considerada parte de los Suelos desérticos de la Patagonia Argentina (Pereyra et al. 2012) donde los rodados patagónicos, arenas eólicas y fluviales conforman el material originario de los mismos, y la calcificación, salinización, argiluviación y erosión-acumulación son los principales procesos pedogenéticos y morfogénicos.

En otra clasificación, según Ferrer et al. (2006), el área estudiada se encuentra alojada dentro de la Región Extraandina en las subregiones Árida Serrana y Árida Mesetiforme, donde predomina la vegetación rala de estepa arbustiva y el desarrollo de suelos entisoles y aridisoles. Los suelos entisoles son preponderantes en la zona del Dorso de los Chihuidos y faja plegada y corrida del Agrio debido a la existencia de pendientes abruptas y estructuras plegadas aflorantes que favorecen la morfogénesis por sobre la pedogénesis, dando lugar a suelos someros con escaso desarrollo. En contrapunto, el territorio al sur y sureste de la región correspondería a la subregión Árida Mesetiforme donde destacan los suelos aridisoles en relación a la subhorizontalidad característica del área.

9 GEOLOGIA

En líneas generales el área de estudio se encuentra localizada en el centro de la Cuenca Neuquina, dentro de la provincia de Neuquén a la que Ramos (2011) dividió en tres provincias geológicas que son la Cordillera Principal, Cordillera Patagónica y Engolfamiento Neuquino (figura 2).

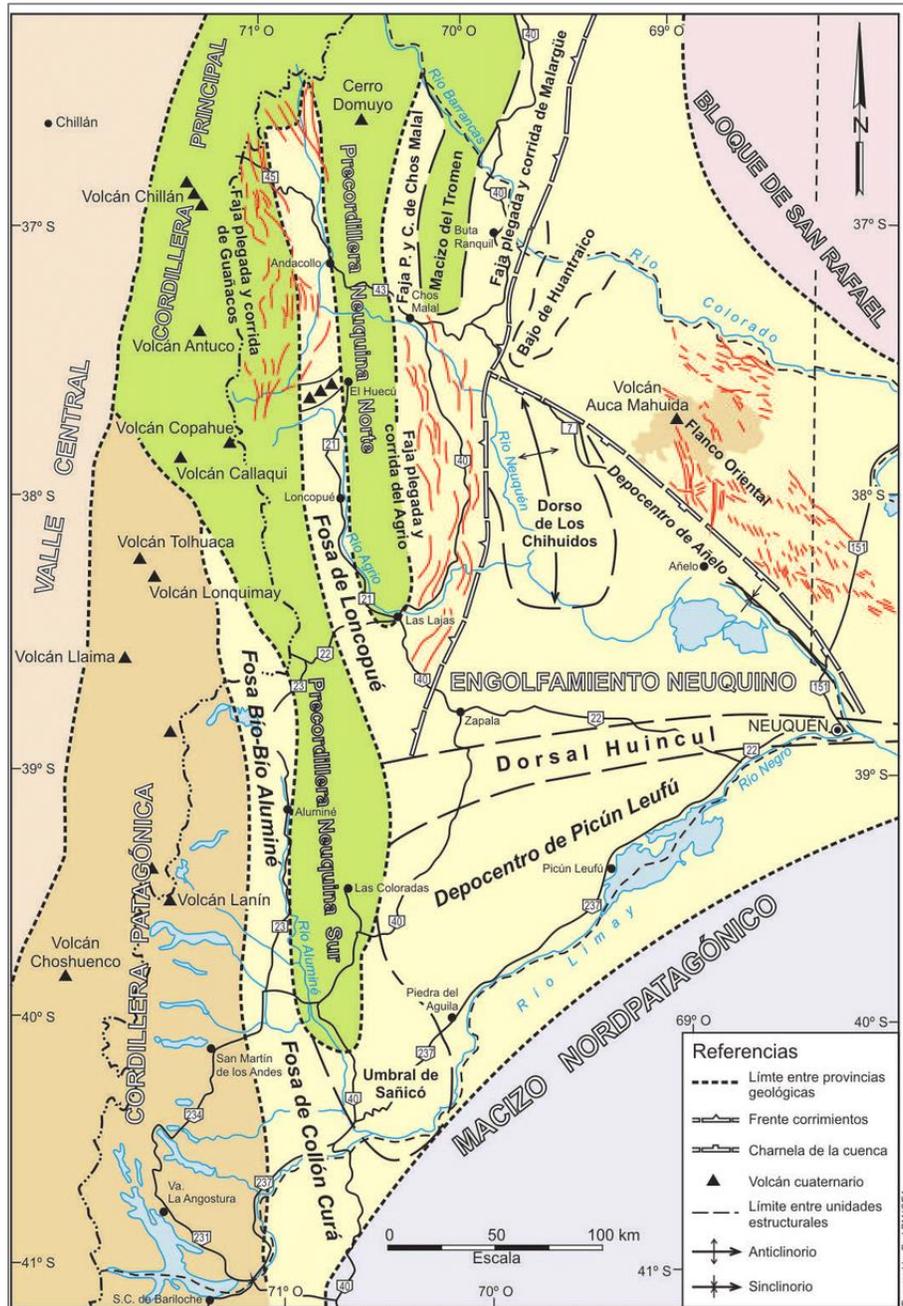


Figura 2: Características principales de las distintas unidades reconocidas en las provincias geológicas de Cordillera Principal, Cordillera Patagónica y Engolfamiento Neuquino. Extraído de Ramos (2011).

La región de estudio pertenecería al Engolfamiento Neuquino (Braccacini 1970) que al mismo tiempo engloba parte de las regiones morfoestructurales de: el sector Interno de la faja plegada y corrida del Agrio (Vergani et al. 1995, Ramos 1998), más precisamente sobre el sinclinal Pampa Amarga Grande (Vergani et al. 1995), el centro sur de Dorso de los Chiuídos (Herrero Ducloux 1946, Braccacini 1970, Ramos 1981) y el ámbito norte de la Dorsal de Huincul (Leanza & Hugo 2005) (figura 3).

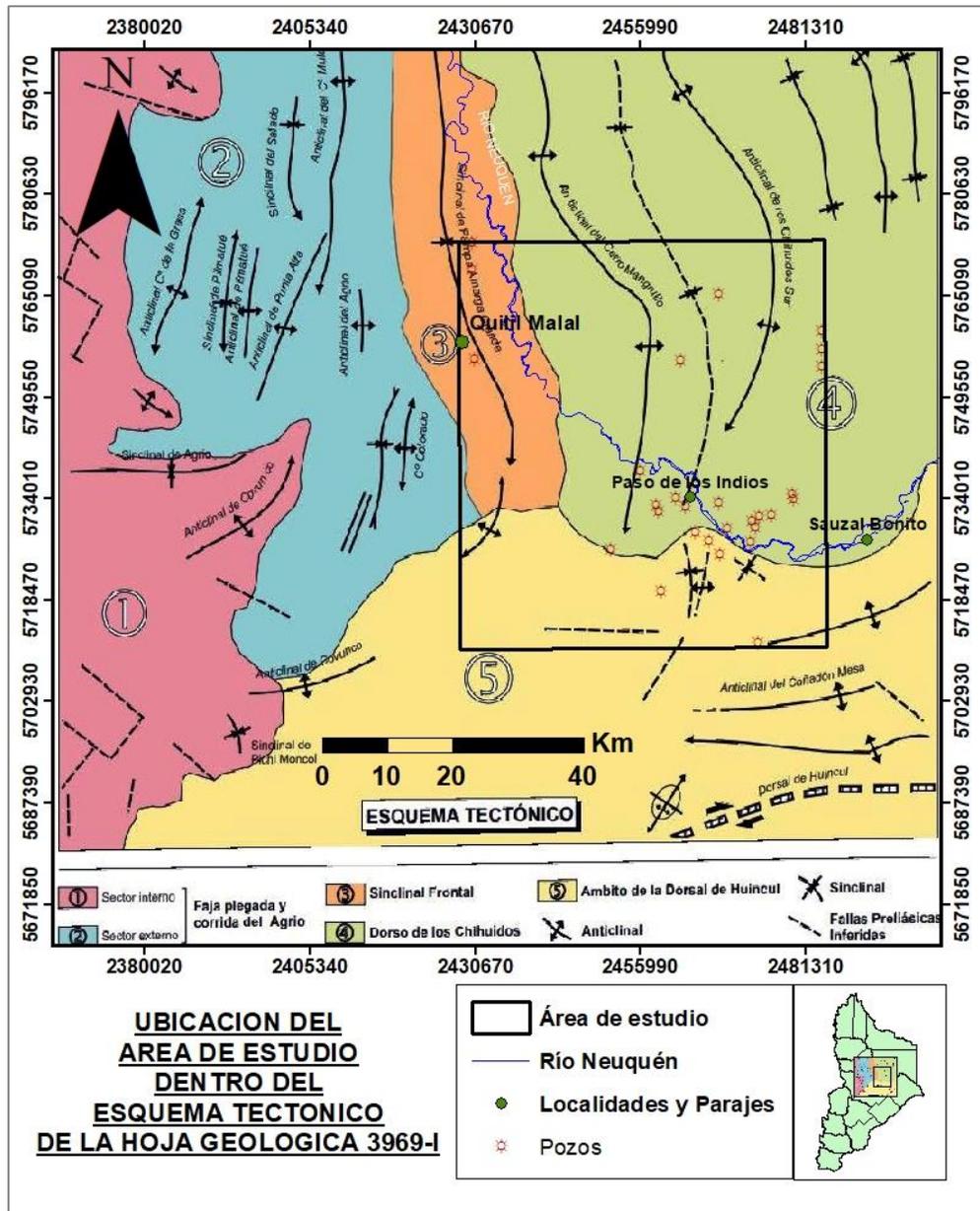


Figura 3: Ubicación del área de estudio dentro del esquema tectónico de la Hoja Geológica 3969-I.

9.1 Faja plegada y corrida del Agrio (FPC)

El sector occidental del área estudiada forma parte de la faja plegada y corrida del Agrio (Braccini 1970). Emplazada entre los 37° y 39° de latitud sur, limitada al oeste por la fosa de Loncopué y al este por el Dorso de los Chihuidos. Ramos (1978) la describe como una deformación compresiva de retroarco asociada a fallas inversas y pliegues con niveles de despegue en evaporitas de estructuras profundas, que tuvo lugar durante el Cretácico Superior hasta el Paleógeno inclusive. La región fue ampliamente estudiada y tradicionalmente dividida en una zona interna de con deformación de piel gruesa y una zona externa con predominante deformación de piel fina y subordinada participación del basamento conformado por el complejo riolítico – ignimbrítico del Grupo Choiyoi (Ramos 1978, 1998; Zapata & Folguera 2005; Zamora Valcarce et al. 2006).

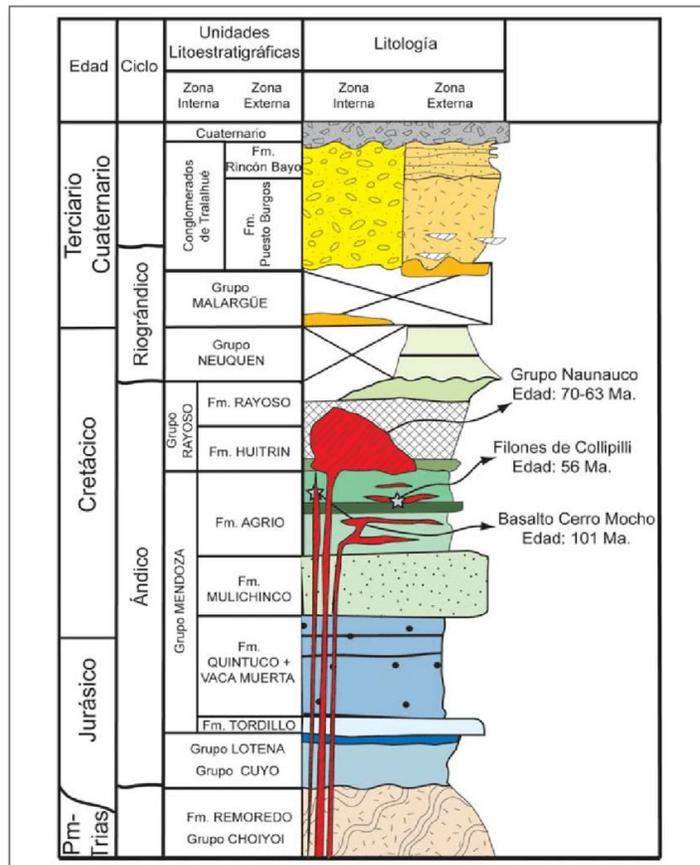


Figura 4: Columna tipo de la faja plegada del Agrio dividida en zona interna y externa. Extraído de Zamora Valcarce et al. 2009.

Dentro del sector externo en el límite con el Dorso de los Chihuidos se encuentra la estructura conocida como sinclinal de la Pampa Amarga Grande, establecido por Vergani et al. (1995) e incluido en la región morfoestructural de Sinclinal frontal en la Hoja Geológica Zapala 3969-I realizada por Leanza & Hugo (2005).

En la figura 4 se puede observar la columna tipo de la faja plegada del Agrio propuesta por Zamora Valcarce et al. (2009).

9.2 Dorso de los Chihuidos (DCh)

También conocido como Alto de los Chihuidos es una estructura anticlinal alargada de orientación noroeste-suroeste ubicada en el sector centro occidental de la Cuenca Neuquina. Posee unos 80 km de largo y 35 km de ancho que cubre una superficie aproximada de 2400 km². Sus límites serían: la Dorsal de Huincul hacia el sur, la Faja Plegada y Corrida del Agrio hacia el oeste, el Bajo de Añelo al este y la Región de Plataforma hacia el noreste (Micucci et al. 2018).

En el área estudiada la cobertura sedimentaria del dorso corresponde a la Formación Candeleros y Rayoso, hacia el sur y hacia el Bajo de Añelo se ubican depósitos de terrazas del Río Neuquén y depósitos actuales (figura 5). La Fm Candeleros se apoya sobre la Fm Rayoso (Mb. Cañadón de la Zorra Mb. Pichi Neuquén) mediante una discordancia regional (Intersenoniana) (Giusano et al. 2014).

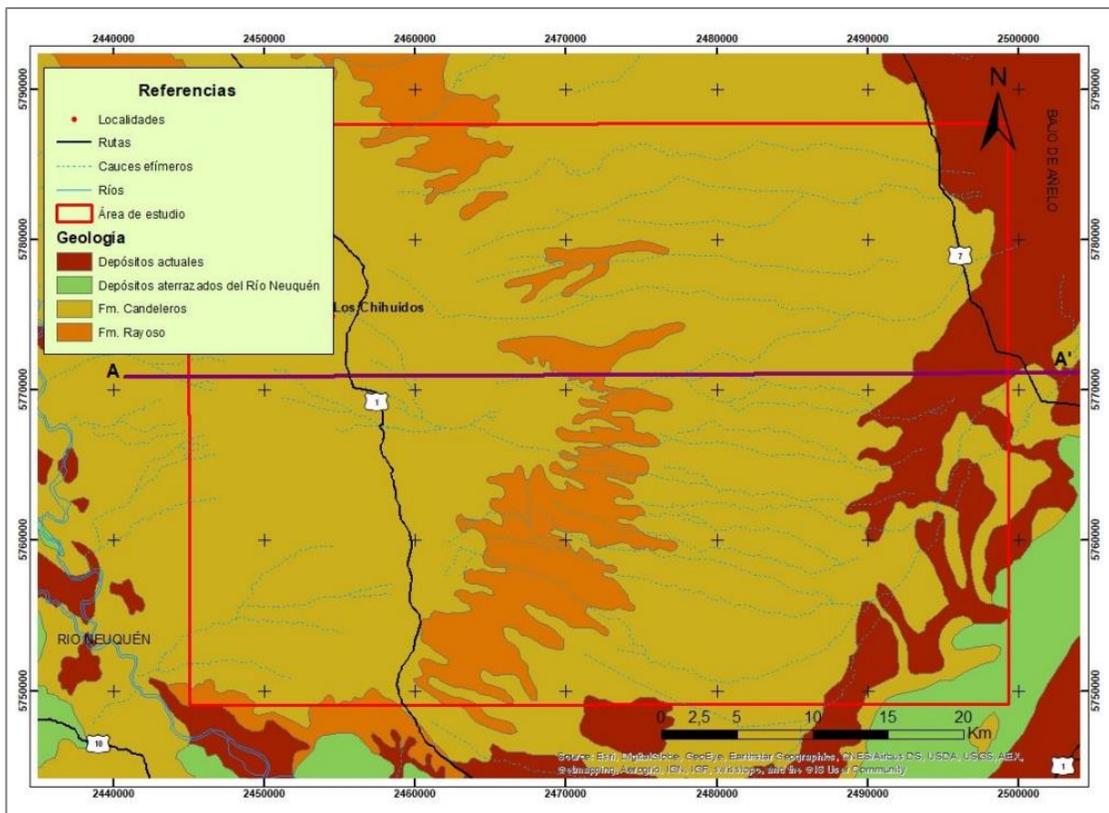


Figura 5: Afloramientos sobre el sector sur del Dorso de los Chihuidos. Extraído de Del Prete (2019).

Leanza et al. (2005) sugieren que el origen de la estructura fue a través de inversión tectónica controlada por el basamento y favorecida por la existencia un sistema de fallas normales previas que fueron responsables de la extensión que dio lugar a la generación de la cuenca Neuquina. Describen a su flanco occidental como más empinado, mientras que su flanco oriental tiene una pendiente más suave hacia el este (2 a 3°) dando lugar a la formación de niveles de terrazas. Sobre este flanco se desarrolla un paisaje geomorfológico característico conocido como “Las Cárceles” (Rodríguez 1990), que se describe como ensanches en forma de una depresión rómbica de paredes verticales excavada en los cauces de que descienden por los flancos del anticlinal,

controlados por el clima durante el cuaternario que desarrolló un sistema de erosión esencialmente fluvial en un ambiente árido y fresco. Sobre este terreno aflora la Fm. Rayoso.

Zamora Valcarce et al. (2009) sugieren que su actual morfología se debe a los últimos movimientos del ciclo Andino que provocaron su exhumación y la erosión de más de 2.5 km de sedimento. Basándose en trazas de fisión de apatita, proponen que existieron tres pulsos de levantamiento. El primero habría sucedido en el Eoceno provocando la erosión de unos 1000 m de sedimentos, seguidos de dos pulsos más en el Mioceno que erodaron entre 700 y 750 m.

9.3 Dorsal de Huincul

La dorsal de Huincul es un rasgo morfoestructural sobresaliente que prácticamente divide a la cuenca Neuquina en dos sectores. Se extiende por 250 km con una orientación general este-oeste desde el frente orogénico andino al oeste hasta la zona de General Roca al este (figura 6). Está constituida por un tren de estructuras anticlinales de orientación preferencial este-oeste fuertemente asimétricas con vigencia predominante al sur, cuyo rechazo vertical excede en muchos casos 1.5 km involucrando desde el basamento Paleozoico hasta los sedimentos del Cretácico Superior (Pángaro et al. 2009). La evolución estructural de la dorsal estuvo regida por dos factores principales: las anisotropías del basamento y la dinámica del margen convergente pacífico (Mosquera et al. 2011). El emplazamiento de la Dorsal de Huincul controló la sedimentación del sector sur de la Cuenca Neuquina durante su actividad tectónica en el Jurásico, Cretácico y parte del Terciario (Silvestro & Zubiri 2008).

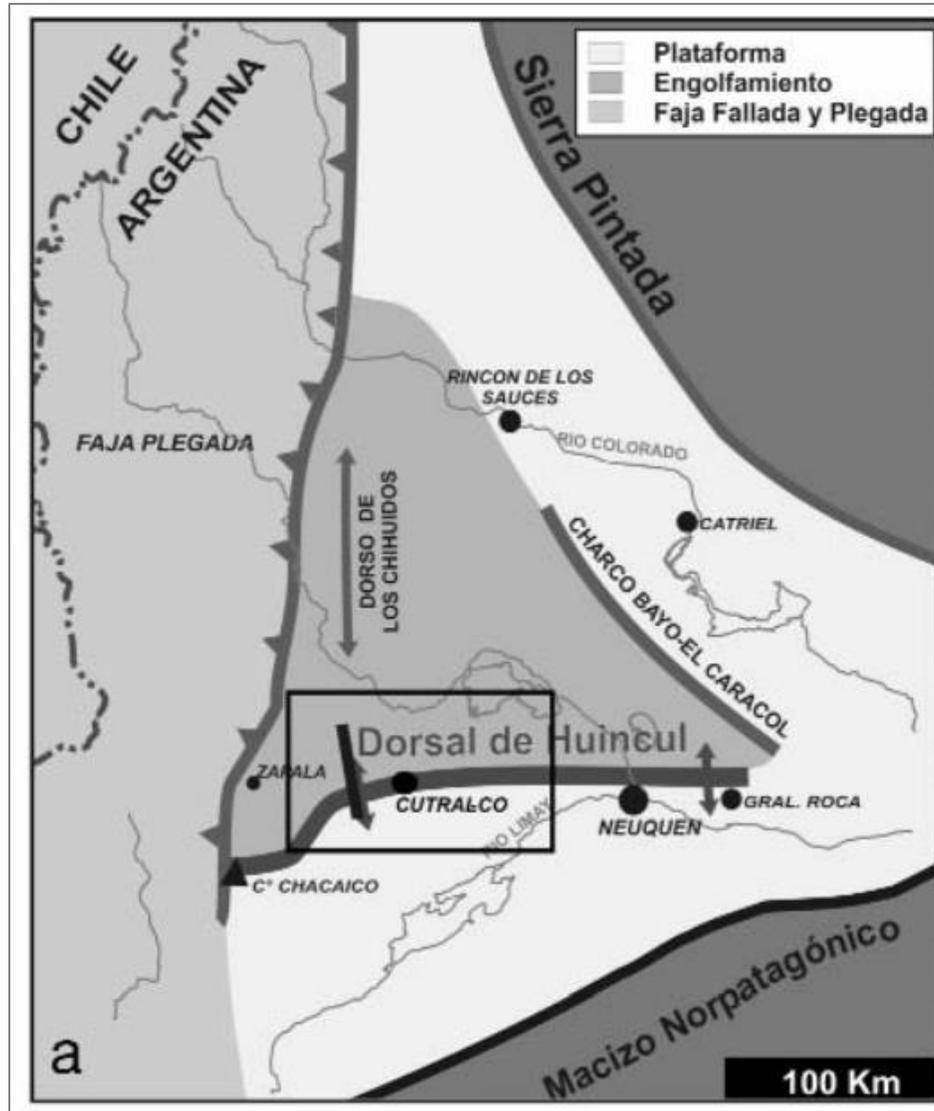


Figura 6: Mapa de ubicación regional de la Dorsal de Huincul. Editado de Pángaro et al. (2009).

Los primeros en interpretar un modelo estructural de la zona fueron Orchuela et al. (1981), Ploszkiewicz et al. (1984) y Orchuela & Ploszkiewicz (1984) apoyándose en un sistema de transcurrencia dextral relacionado a fallas de basamento de alto ángulo que explicaría la presencia de estructuras en flor positiva o negativas. Así las estructuras anticlinales de rumbo noreste quedarían ubicadas al este, en una zona de transpresión, mientras que las estructuras de transtensión quedarían localizadas al oeste del sistema, con un rumbo noroeste. Eisner (1991) y Uliana et al. (1995) relacionan las estructuras positivas con la reorganización de campos de esfuerzos por subsidencia extensional a escala regional durante la apertura del océano Atlántico y a la inversión de antiguos hemigrabenes triásicos durante el Jurásico.

Mediante la integración de datos de sísmica 3D Silvestro & Zubiri (2008) proponen un esquema tectónico alternativo donde explican que la geometría y estructuras a escala regional de la Dorsal se debe a la convergencia oblicua entre dos zonas de comportamiento diferente bajo un campo de

esfuerzos noroeste-sureste, relacionado a la subducción en el margen Pacífico. Hacia el sureste se desarrollaría una zona de comportamiento rígido que actuaría como contrafuerte, y hacia el noroeste la corteza continental es adelgazada por extensión y debilitada térmicamente, posibilitando la reactivación y desarrollo de estructuras transcurrentes y compresivas (figura 7).

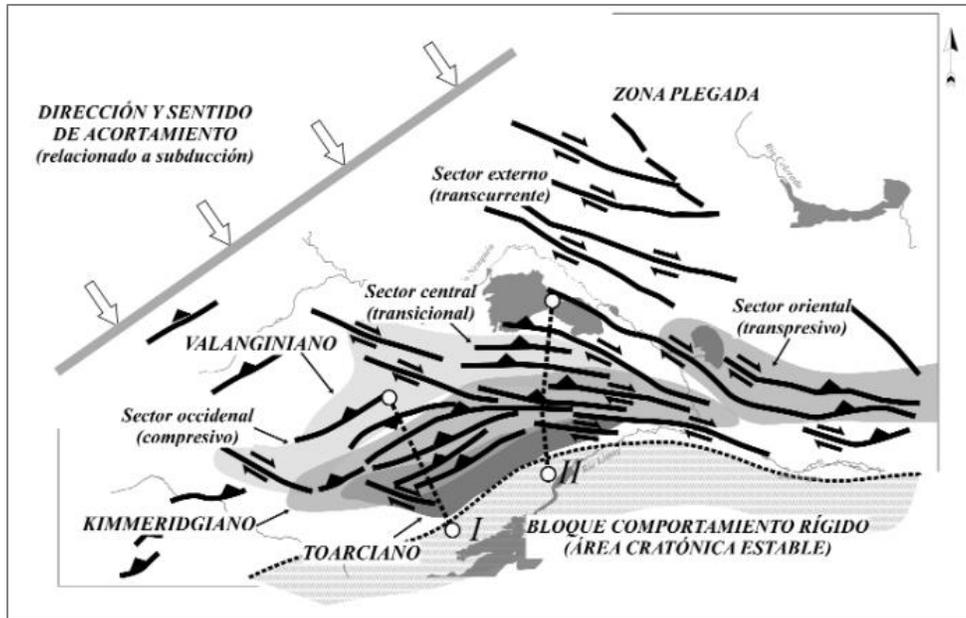


Figura 7: Mapa de simplificado de los lineamientos reconocidos en el entorno de la dorsal, con la distribución de zonas compresivas y transcurrentes, ubicación de tres estadios reconocidos de máxima deformación y límite aproximado entre el sector de comportamiento rígido y el sector plegado. Editado de Silvestro & Zubiri (2008).

Parte de la zona de estudio se encuentra localizada en el sector occidental externo del modelo propuesto por Silvestro & Zubiri (2008) (figura 8). Allí se observa una horizontalidad generalizada de las formaciones estudiadas con cierto levantamiento y acuñamiento de las formaciones Centenario Inferior y Superior que en este trabajo fueron interpretadas en conjunto como Formación Agrio.

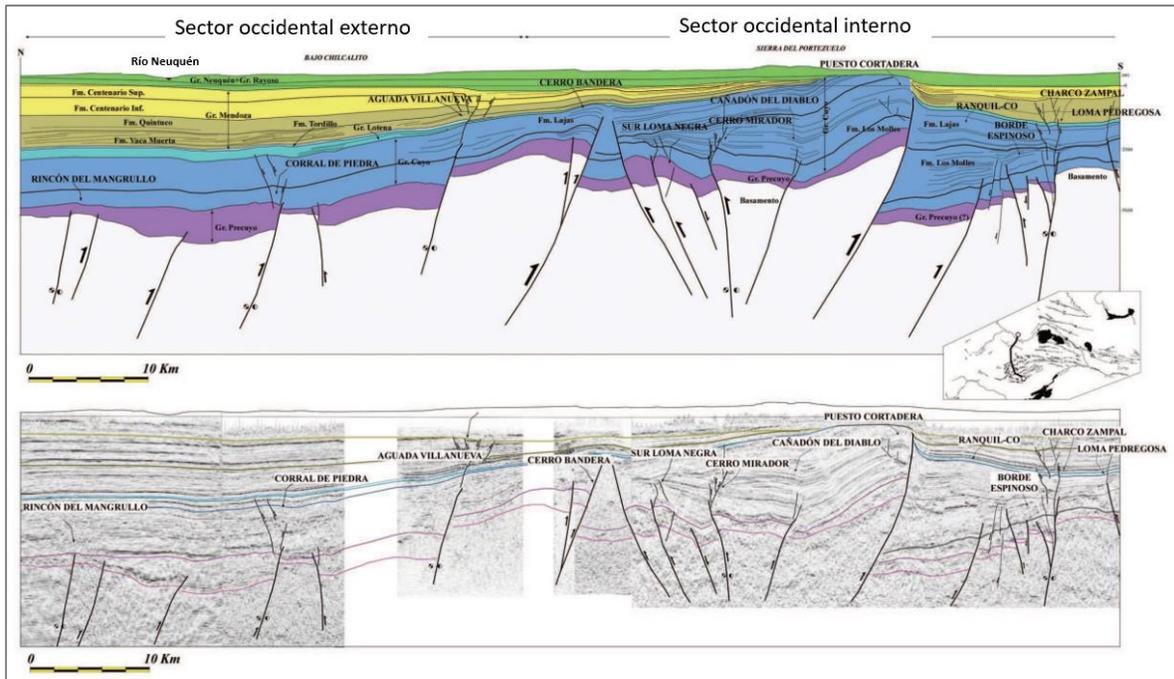


Figura 8: Sección estructural regional del sector occidental interno y externo de la Dorsal de Huincul donde se observa poca deformación en el área circundante al Río Neuquén que forma parte de la región estudiada. Modificado de Silvestro & Zubiri (2008).

9.4 Estratigrafía

La cuenca Neuquina registra una columna sedimentaria de más de 6000 m de espesor que incluye rocas marinas y continentales de edad Triásico Superior a Paleoceno (Howell et al. 2005)

Leanza y Hugo (2005) en la Hoja Geológica Zapala 3969-I describieron y recopilaron antecedentes que involucran la estratigrafía y geología estructural del Dorso de Los Chihuidos y llanura aluvial del río Neuquén, que fueron utilizados para el desarrollo del presente trabajo.

9.4.1 Formación Mulichinco

Se consideró al tope de Mulichinco como base de las interpretaciones estratigráficas en el presente trabajo. La Fm. Mulichinco fue definida por Weaver en 1931 como una asociación de areniscas y areniscas calcáreas con fósiles marinos. En el área de la Hoja Geológica Zapala 3969-I la edad de la formación corresponde al Valanginiano medio y al Valanginiano superior temprano.

9.4.2 Formación Agrio

De edad Valanginiana Tardía – Barremiana Temprana es la unidad más joven del Grupo Mendoza. Se apoya mediante una importante superficie transgresiva de desarrollo regional sobre los términos clásticos de la Fm. Mulichinco, y es cubierta por los depósitos carbonáticos, clásticos y evaporíticos de la Fm. Huitrín. Su mayor desarrollo y los más característicos afloramientos se registran a lo largo del sector andino (occidental) de la Cuenca Neuquina. El espesor de la Fm. Agrio es superior a los 1500 m en los sectores axiales del depocentro Neuquino (Spalletti et al. 2011) (figura 9). La formación suele dividirse en tres miembros. Los miembros inferior y superior se denominan Pilmatué y Agua de la mula, respectivamente. Ambos fueron depositados en un ambiente marino y se conforman por espesas sucesiones de lutitas oscuras (Leanza et al. 2001). Tanto hacia el norte de la Cuenca Neuquina como hacia el sur de la Dorsal de Huincul estos miembros reducen su espesor progresivamente y se tornan más ricos en sedimentitas carbonáticas (Spalletti et al. 2011).

Entre estos miembros se ubica el Miembro Avilé, que es una unidad silicoclástica compuesta principalmente por depósitos arenosos (también denominada «Arenisca Avilé») que se encuentra representada con una amplia distribución en el sector central de la Cuenca Neuquina (Veiga et al. 2011).

En la región oriental y nororiental del Engolfamiento Neuquino, la Fm. Agrio gradúa de lutitas a fangolitas con intercalaciones de areniscas y conglomerados de ambiente continental que se denomina Formación Centenario (Digregorio 1972).

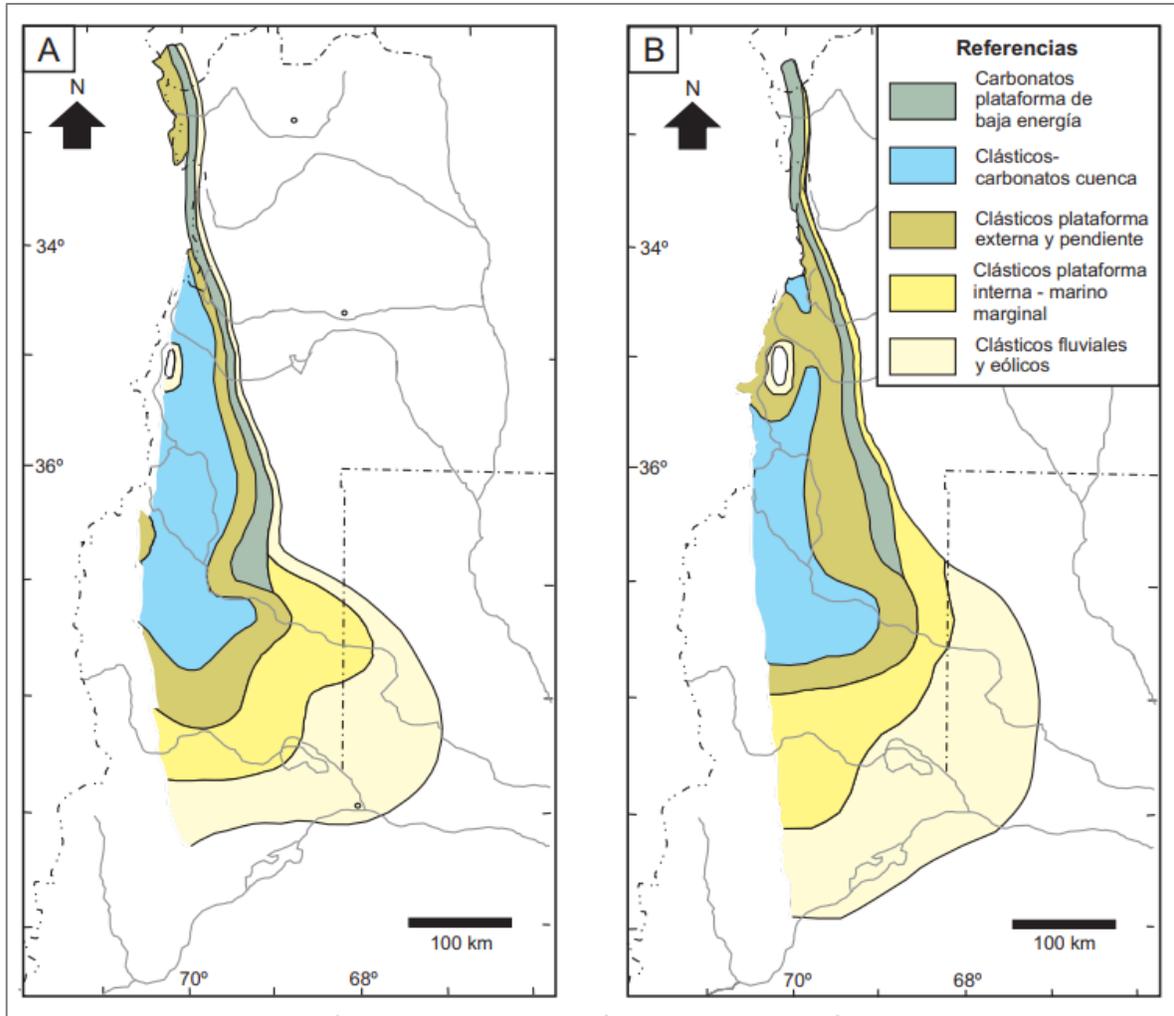


Figura 9: Reconstrucciones paleogeográficas correspondientes a los depósitos marinos de la Formación Agrio (Legarreta y Uliana, 1999) para los tiempos Valanginiano Tardío – Hauteriviano (A) y Hauteriviano Tardío (B). Extraído de Spaletti et al. (2011).

9.4.3 Formación Huitrín

Primeramente definida por Groeber (1946) como *“El lugar de desarrollo espectacular del ex - Yeso de Transición se encuentra en Huitrín, en la vecindad de la hoja Chos Malal, y en el núcleo del braquianticlinal de Los Chihuidos, puesto a la vista por el profundo río seco de Huitrín, cuya acción erosiva partió de la orilla oriental del río Neuquén”*, en este trabajo se tomará como límite superior al Miembro La Tosca propuestos por Herrero Dacloux (1946), Digregorio (1972) y Zavala & Ponce (2011) más recientemente.

Entonces la Formación Huitrín está compuesta en su base por el Miembro Troncoso inferior, siendo una unidad clástica de origen continental de edad Barremiana compuesta por depósitos fluviales y eólicos (Veiga & Vergani 2011), apoyándose en discordancia en la parte superior del Mb. Agua de la mula de la Fm. Agrio y el Mb. Chorreado. Por encima de este último, mediante un

La Fm. Rayoso se encuentra limitada en la base mediante un contacto neto con los bancos calcáreos del Mb. La Tosca de la Fm. Huitrín y a su vez es cubierta por la Fm. Candeleros mediante la discordancia Intersenoniana, donde se observa a menudo el rasgo geométrico de angularidad tanto en afloramiento, como en subsuelo.

El ambiente depositacional de la Fm. Rayoso habría sido lacustre somero y de salinidad variable, con climas alternantes entre períodos húmedos y de aridez extrema (Zavala & Ponce 2011).

En las inmediaciones de Quilil Malal los miembros de la formación tienen las siguientes características según la Hoja Geológica Zapala 3969-I:

- Miembro Salina: Arcilitas varicolores con banquitos de yeso y aspecto bandeado.
- Miembro Rincón: Alternancia de areniscas castaño rojizas y fangolitas con *climbing ripples*.
- Miembro Quilil Malal: Arcilitas varicolores con niveles yesíferos de aspecto bandeado.
- Miembro Pichi Neuquén: Areniscas y fangolitas rojas.
- Miembro Cañadón de la Zorra: Arcilitas rojizas y anaranjadas con bancos de yeso y margas.

9.4.5 Grupo Neuquén

Limitada en base y techo por las discordancias Patagonídica y Huantráica respectivamente, el Gr. Neuquén conforma una sucesión de depósitos continentales de origen fluvial, eólico y lacustre somero, desarrollado en la Cuenca Neuquina entre el Cenomaniano Temprano y el Campaniano Medio (Cretácico Superior), alcanzando un máximo de 1200 m (Garrido 2011).

Según Tunik et al. (2010) la depositación de esta espesa secuencia está vinculada a la actividad tectónica compresional sobre el margen andino a fines del Cretácico, provocando la migración de los depocentros sedimentarios hacia el este durante el inicio de la fase de antepaís de la Cuenca Neuquina.

Las formaciones que constituyen el Gr. Neuquén se reúnen en tres Subgrupos según el esquema litoestratigráfico propuesto por Ramos (1981) (figura 11).

En el área estudiada se reconoció hasta la Formación Cerro Lisandro, la unidad cúspide del Subgrupo Río Limay, aflorando en variados sectores en el sureste del área de estudio.

9.4.6 (Subgrupo Río Limay)

Este subgrupo fue presentado inicialmente como Formación Río Limay por de Ferrariis (1968) agrupando con el rango de miembros a Candeleros, Huincul y Cerro Lisandro. En 1981 Ramos eleva a estos miembros al rango de formación quedando Candeleros, Huincul y Cerro Lisandro como formaciones del ahora Subgrupo Río Limay. La edad de este subgrupo ha sido asignada al Cenomaniano-Turoniano.

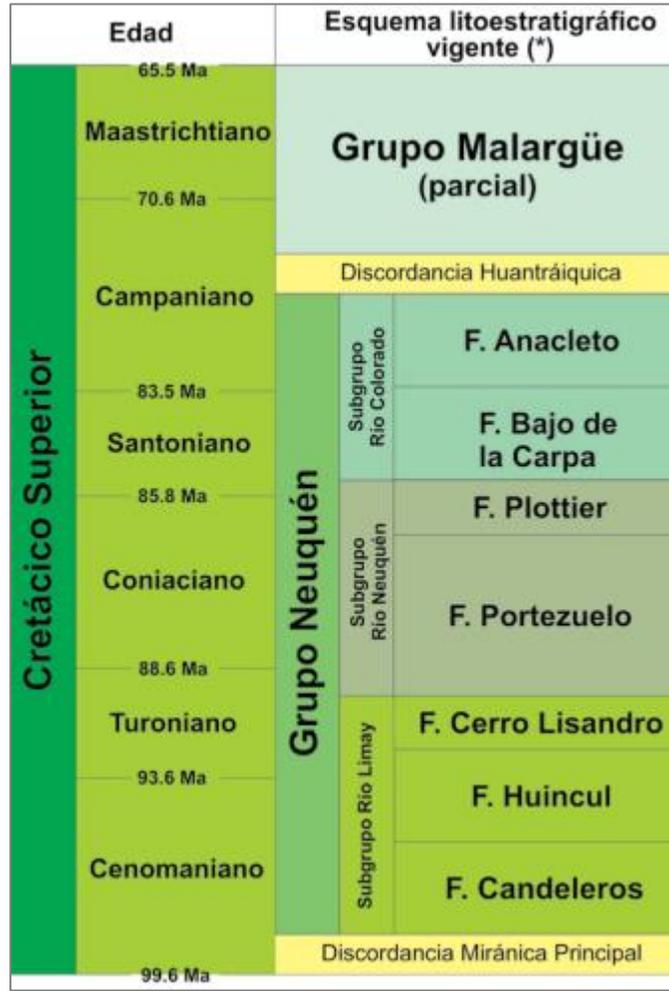


Figura 11: Esquema litoestratigráfico de Cazau y Uliana (1973), modificado según Uliana y Dellapé (1981) y Ramos (1981). Tomado de Garrido (2010).

9.4.6.1 *Formación Candeleros*

Es la formación con mayor representación en superficie dentro del área de estudio abarcando gran parte del sector centro este de la zona.

En líneas generales, sus componentes litológicos dominantes se encuentran conformados por areniscas cuarzolíticas, finas a gruesas, con granos subangulosos a subredondeados y moderada a buena selección. La presencia en estos depósitos psamíticos de una abundante matriz fangosa, constituye un rasgo característico que los distingue fácilmente del resto de las unidades del Gr. Neuquén (Garrido 2011).

La edad de la formación es Cenomaniana inferior (Orchuela y Ploszkiewicz, 1984), y se apoya en para concordancia sobre la Formación Rayoso posterior a la Discordancia Miránica Principal (Stipianic & Rodrigo 1970).

Las sedimentitas de la Fm. Candeleros denotan haberse depositado en un ambiente fluvial dominado por procesos traccionales con fuerte migración lateral, lo que determina cuerpos areno-conglomerádicos multiepisódicos (Leanza et al. 2005).

9.4.6.2 *Formación Huincul*

La Fm. Huincul es de edad Cenomaniana superior (Wichmann 1927; Herrero Ducloux 1946) y está constituida por bandas de areniscas amarillentas, gris verdosas y verde amarillentas alternadas con otras de tonos rosados que a su vez se intercalan con fangolitas rojas. Su característico color amarillo se debe a la presencia de óxido férrico. Pons et al. (2011) describieron afloramientos de 135 m de potencia en el margen izquierdo del río Neuquén en el área del prospecto de cobre Tordillos al sur del DCh. Los depósitos en este sector tienen estratificación en artesas, conglomerados intraformacionales y abundantes fragmentos de troncos que habrían rellenado canales fluviales multiepisódicos (Miall 1996).

9.4.6.3 *Formación Cerro Lisandro*

Es la culminación del ciclo sedimentario del Subgrupo Río Limay, a través de un pasaje transicional en concordancia sobre la Fm. Huincul y se adjudica al Cenomaniano superior- Turoniano inferior (Weaber 1931).

La Fm. Cerro Lisandro está representada predominantemente por fangolitas rojas, cuyo ambiente se vincula con la planicie fangosa distal de un sistema fluvial (Leanza et al. 2005).

10 REGISTROS DE POZO

La interpretación de registros eléctricos es una herramienta fundamental en hidrogeología que proporciona información valiosa sobre las condiciones del subsuelo donde se alojan las formaciones contenedoras de agua subterránea. Estos se usan para conocer las características físicas y geoquímicas de las rocas y fluidos que contienen, con el objetivo de identificar acuíferos y determinar su potencial como recurso natural. Entre las características que se pueden analizar para la identificación y caracterización de acuíferos se encuentran, por ejemplo: profundidad, espesor, porosidad, permeabilidad y contenido de arcillas de las rocas, así como también se pueden conocer las propiedades del fluido que contienen, tales como su salinidad y resistividad.

Los registros de pozo o bien llamados perfiles de pozo incluyen una serie de procedimientos y técnicas destinadas a obtener la mayor cantidad de información del material atravesado durante una perforación. Además se obtienen datos del tipo de fluidos que pueden ocupar los poros interconectados de las rocas en subsuelo.

Toda la información obtenida por toma de muestras o registros eléctricos es volcada a un *software* de procesamiento (Petrel 2017.4) que en *tracks* o pistas en las que el geólogo puede realizar interpretaciones estratigráficas y/o petrofísicas según las necesidades.

10.1 Registros directos

Durante la etapa de perforación se extraen recortes de roca (*cutting*) que permiten ir construyendo el perfil litológico del pozo sobre la base de las descripciones litológicas efectuadas. La calidad y cantidad de muestras que se extraigan durante la perforación va a depender de los objetivos de la operadora que se encuentre trabajando en el área.

10.1.1 Perfil Litológico por recortes de roca (*cutting*)

Para este trabajo se utilizaron los registros relacionados al control geológico, a través de recortes de roca o *cutting*.

Los también llamados recortes de perforación, de acuerdo a la NOM-115-SEMARNAT-2003, son los fragmentos de roca que se obtienen del proceso de perforación; constituidos por minerales de las formaciones perforadas, entre otros, arcillas, cuarzo, feldespatos, carbonatos y otros compuestos calcáreos y de sílice que están impregnados con fluidos de perforación (Méndez Villegas et al. 2013). Desafortunadamente, la reconstrucción de una secuencia litológica en términos de espesor y composición, no siempre se puede realizar con confianza a partir de recortes que se han mezclado, lixiviado y contaminado durante su transporte por el lodo de perforación a la superficie (Serra 1984).

10.1.1.1 Track de control geológico

Para este trabajo, a cada litología descrita en los controles geológicos se le asignó un nombre (*name*), un código (*code*) y una rastra (*pattern*) con diversos colores de fondo (figura 12.a) para que luego el *software* las volcara en un *track* de litologías según la profundidad del registro de perforación (figura 12.b).

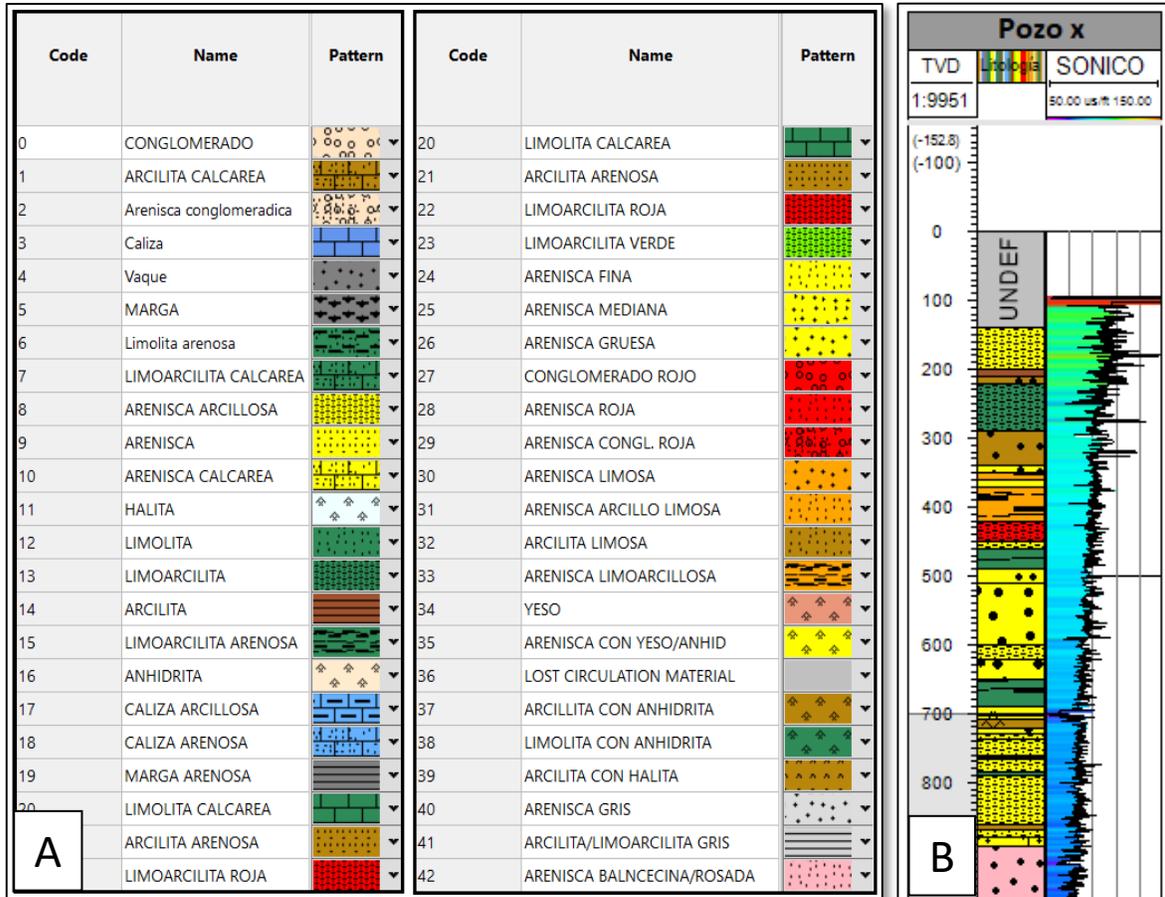


Figura 12.a) Simbologías asignadas para las litologías observadas en recortes de perforación. Figura 12.b): Ejemplo de track de litologías junto a un registro sónico de referencia.

10.2 Registros indirectos

La toma de información durante la perforación puede llevarse a cabo de forma indirecta, mediante técnicas no agresivas que igualmente nos llevan a inferir las características de las formaciones. (García y Medina 2018)

10.2.1 Registros eléctricos

Dentro de esta categoría se encuentran el Sónico, SP (Potencial Espontáneo), de resistividad, rayos gamma, Neutrón y Densidad. Los perfiles obtenidos a partir de estos registros proporcionan estimaciones indirectas sobre la calidad de la roca, la porosidad y fluidos de saturación (agua, petróleo o gas).

Los conceptos teóricos sobre registros eléctricos han sido extraídos de varios manuales de fundamentación y aplicación. Los más utilizados para este trabajo fueron “*Fundamentals of well-log interpretation*” (Serra 1984), “*Manual de Registros Geofísicos de Pozo y algunas Aplicaciones*” (Garduza 2019) y “*Principios/Aplicaciones de la Interpretación de Registros*” (Schlumberger).

Para la realización del presente estudio se utilizaron e interpretaron registros de tiempo de tránsito (sónico), de rayos gamma y de inducción (resistividad).

10.2.1.1 Proceso de invasión

Para evitar que durante la perforación el pozo se desmorone, se pretende que la presión hidrostática de la columna del lodo sea mayor que la de la presión poral de las formaciones haciendo que el lodo se infiltre en la formación permeable. El mismo va perdiendo poder de infiltración a medida que las partículas sólidas forman un enjarre en la pared del agujero.

La zona donde el lodo filtrado desplaza los fluidos del reservorio se llama *flushed zone* (zona lavada). Le sigue una zona donde el filtrado desplaza parcialmente al fluido de formación que se conoce como *transition zone* (zona de transición) y, finalmente se distingue la *uninvaded zone* (zona no invadida) donde el lodo no alcanza a penetrar la formación (figura 13). Nótese además que las formaciones de alta porosidad permiten el almacenamiento de más lodo filtrado por distancia de invasión, por lo tanto, la profundidad de invasión es menor cuando la formación tiene baja porosidad.

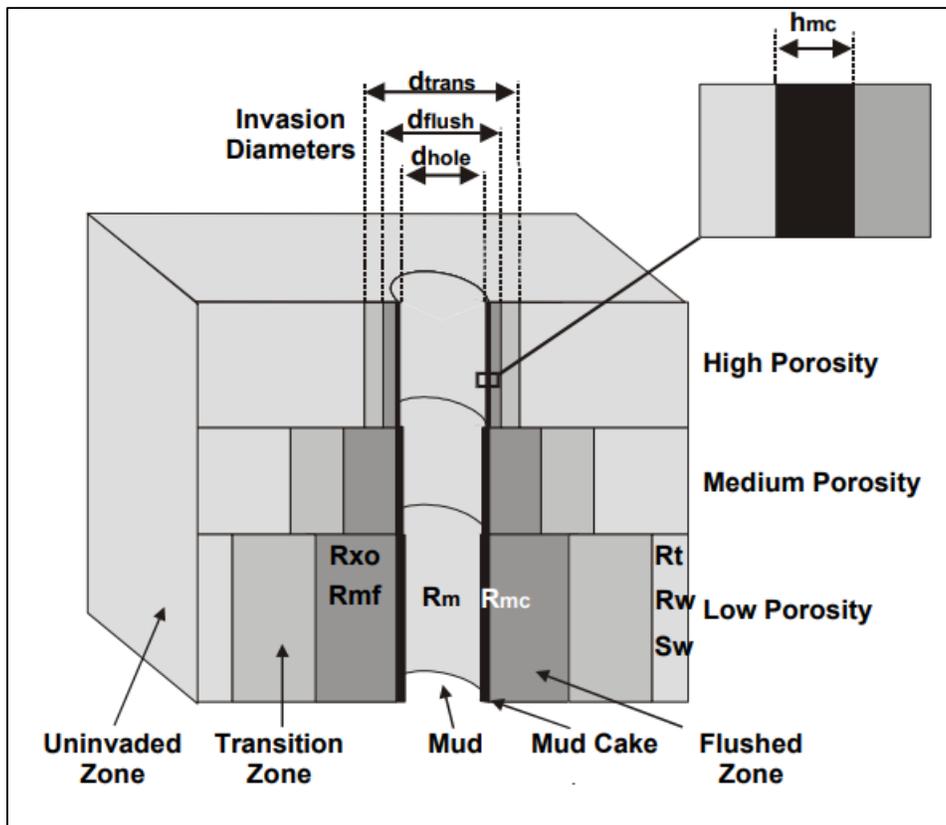


Figura 13: Ambiente de invasión del lodo de perforación en un pozo. Modificado de Glover s.f.

10.2.1.2 Registro de tiempo de tránsito o sónico (Δt $\mu s/ft$)

Este registro se obtiene a partir de un transmisor que emite pulsos sónicos y un receptor que los capta y registra. La herramienta mide el tiempo que tarda una onda sonora en atravesar un pie de formación, el cual se conoce como tiempo de tránsito (Δt). Este intervalo depende de la litología y porosidad de la formación atravesada, entonces cuando se conoce la litología, el registro sónico resulta muy útil para determinar porosidades.

Las ondas sonoras en litologías de formaciones comunes tienen velocidades de entre 6000 a 23000 pies/seg. Para evitar fracciones decimales pequeñas se registra el inverso de la velocidad definido como “tiempo de tránsito”, en microsegundos por pie ($\mu s/ft$). En la tabla 1 se muestran los tiempos de tránsito y velocidad de matriz de las litologías más comunes.

10.2.1.2.1 Track para curva de Registros sónicos

Para el presente trabajo la curva de tiempo de tránsito se representa en el **Track SONICO** ($\mu s/ft$) con un valor límite inferior de 50 $\mu s/ft$ y otro superior de 150 $\mu s/ft$, que se lee de izquierda a derecha (figura 14).

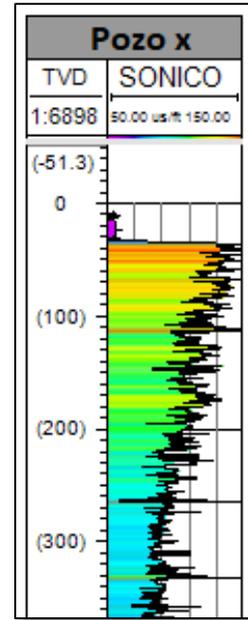


Figura 14: Ejemplo de track para curva de tiempo de tránsito en $\mu s /ft$.

Tabla 1: Tiempo medio de tránsito de intervalo y velocidad de matriz en rocas. Modificado de Bassiouni (1994).

Material	Velocidad de matriz V_p (ft/sec)	Tiempo de tránsito Δt ($\mu s/ft$)
Arenisca	18000 a 19500	55.5 a 51.0
Limolita	21000 a 23000	47.6 a 43.5
Dolomita	23.000	43.5
Anhidrita	20.000	50
Lutitas	5900 a 17000	170 a 60
Sal	15000	66.7

10.2.1.3 Registro de rayos gamma (RG gAPI)

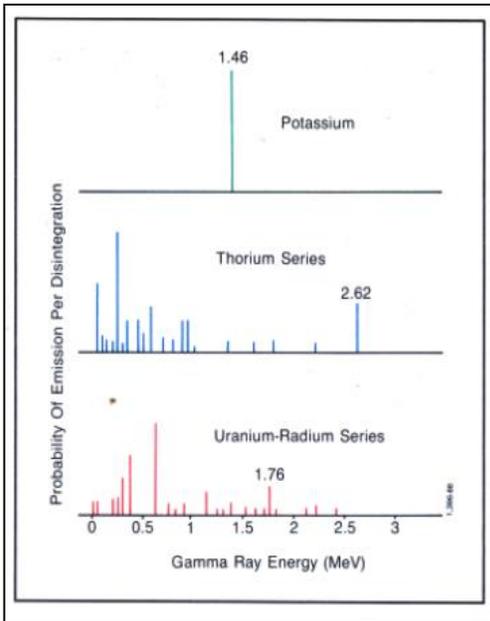


Figura 15: Espectros de emisión de rayos gamma de minerales radioactivos. Extraído de Principios de la interpretación de registros de Schlumberger (2009).

Lo expresado en el manual de principios de la interpretación de registros de Schlumberger indica que el perfil de Rayos Gamma o *Gamma Ray* (RG) mide la totalidad de radiación gamma natural (en grados API) emitida desde una formación. Esta radiación se origina desde el Potasio-40 y los isotopos de la serie del Uranio-Radio y Torio (figura 15).

Una vez que los rayos son emitidos por un isotopo de la formación, estos reducen su energía progresivamente como resultado de las colisiones con otros átomos de la roca. A este fenómeno se lo conoce como efecto Compton, y ocurre hasta que la radiación gamma es tan baja que es completamente absorbida por la formación.

arcilla, por esto es que las lutitas tienen mayores emisiones de rayos gamma que las arenas. Entonces los valores mínimos del registro (*Gamma Ray limpio*) corresponden a formaciones con muy bajo o nulo contenido de arcillas, mientras que los valores más altos (*Gamma Ray sucio*) se asocian a unidades arcillosas. No obstante, las arenas con alto porcentaje de feldespatos alcalinos, micas, ceniza volcánica o fragmentos ígneos radiactivos también pueden arrojar valores de rayos gamma elevados.

Su utilidad para la identificación de capas con o sin contenido de arcillas convierte al registro de rayos gamma en una herramienta sumamente importante para la correlación de unidades litológicas en general. El mismo sirve, además, como un complemento o sustituto para la curva SP en formaciones muy resistivas, en pozos perforados con lodos salados donde el potencial espontaneo es insignificante, cuando el lodo de perforación es base de aceite o en perforaciones con aire donde el SP no puede registrarse.

10.2.1.3.1 Track para curva de registros de rayos gamma

Para el presente trabajo la curva de rayos gamma se representa en un Track propio **RG (gAPI)** con un valor límite inferior de 0 gAPI y otro superior de 200 gAPI, que se lee de izquierda a derecha (figura 16).

Durante la meteorización de las rocas, los elementos radiactivos que contienen se desintegran en partículas de tamaño

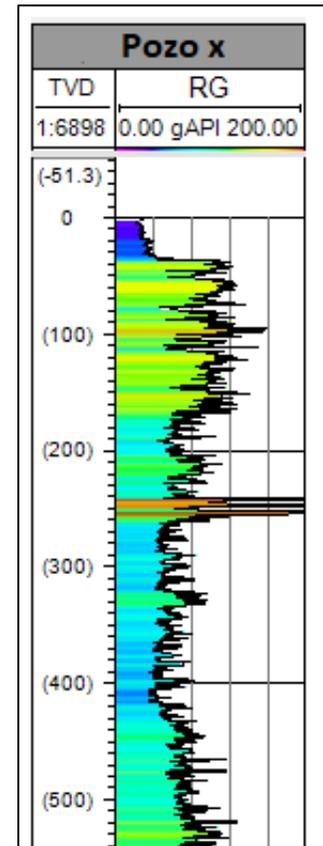


Figura 16: Ejemplo de track para curvas de Rayos Gamma (RG).

10.2.1.4 Registro de resistividad o inducción (ILD/LLD Ohm.m)

Los perfiles resistivos o de inducción miden resistividades someras, medias y profundas, según las zonas de invasión del lodo de perforación. Los más utilizados son el Registro Lateral (*Laterolog*) y el Registro de Inducción (*Induction Log*). El registro lateral se utiliza en lodos conductivos (lodo salado) y el registro de inducción se utiliza en lodos resistivos (lodo fresco o base aceite) (Garduza 2019). Con estos puede medirse la resistividad de las distintas zonas de invasión del lodo.

La resistividad es el inverso de la conductividad, y es la capacidad que tienen las rocas de oponerse al paso de corriente eléctrica inducida. La misma depende de la sal disuelta en los fluidos presentes en los poros de las rocas. Su medición proporciona evidencias del contenido de fluidos en las rocas.

Estos son utilizados para calcular la resistividad verdadera de la roca (R_t) y la resistividad del agua de formación (R_w).

10.2.1.4.1 Curvas de los Registros de inducción.

- SFL** = *Spherical Induction Log*. Para profundidades someras (0.5 – 1.5'). Mide la resistividad de la zona lavada (R_{xo}).
- MIL / LIM** = *Medium Induction Log*. Para distancias medias (1.5 – 3.0').
- DIL / ILD** = *Deep Induction Log*. Para profundidades de más de 3.0'. Miden la resistividad de la formación (R_t).

10.2.1.4.2 Curvas de los Registros Laterales.

- MSFL** = *Microspheric Laterolog*. Para las proximidades (1.0 y 6.0'). Lee la resistividad de la zona lavada (R_{xo}).
- MLL / LLM** = *Micro Laterolog*. Para las proximidades (1.0 y 6.0').
- SLL / LLS** = *Someric Laterolog*. Para profundidades someras (0.5 y 1.5').
- DLL / LLD** = *Deep Laterolog*. Para profundidades de más de 3.0'. Miden resistividad de la formación (R_t).

10.2.1.4.3 Track para curva de registros de resistividad

Para la confección de las curvas resistivas en el presente trabajo, se toman en cuenta los datos de resistividad profunda (LLD o ILD) de cada pozo, asignados al **track ILD/LLD (Ohm.m)** con un límite inferior de 0.2 Ohm.m y otro superior de 2.000 Ohm.m, leyéndose de izquierda a derecha (figura 17).

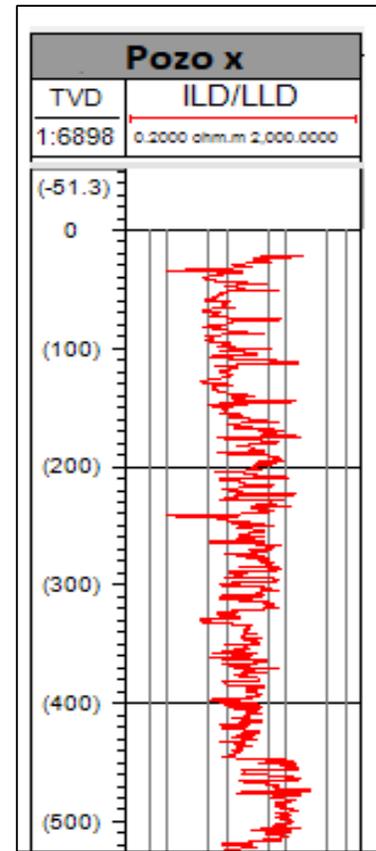


Figura 17: Ejemplo de track para curvas de resistividad utilizado.

11 PASES Y CARACTERISTICAS DE LAS FORMACIONES EN LOS REGISTROS ELECTRICOS

11.1 Pozos Seleccionados

La selección de los 25 pozos utilizados para el procesamiento de registros eléctricos y control geológico proporcionados por la SEMH y una operadora de hidrocarburos nacional, se basó en la calidad y profundidad de adquisición de los perfiles de rayos gamma, sónico, resistividad, y recortes de perforación desde la superficie o cercana a ella. Los registros que reúnen estas condiciones son los que se presentan en la tabla 2.

Los datos se encuentran en formato digital *Log ASCII Standard* (LAS) y fueron procesados e interpretados mediante el *software* Petrel.2017.4.

Tabla 2: Coordenadas de los pozos, tipos y profundidad de registros.

POZO	COORDENADAS CHOS MALAL			REGISTROS ELECCTRICOS			CONTROL GEOLOGICO	PROFUNDIDAD DE REGISTRO	
	X	Y	Z	RG	SONICO	ILD/LLD		INICIAL (m)	FINAL (m)
AP1	2483864	5757049	441,5	Si	Si	Si	Si	345,94	1744,8
AP2	2483900	5759900	451	Si	Si	Si	Si	352,8	1744,06
AP8	2483767,57	5754293,89	431	Si	Si	Si	Si	345	1694
BC-a	2451452	5726345	783	Si	Si	Si	Si	16	3881
H-a	2462251	5755299	1161	Si	Si	Si	Si	481	1907
M-a	2464399	5728953	646	Si	Si	Si	Si	0	2900
M-b	2456009,87	5738376,6	545	Si	Si	Si	Si	4,9	1590,9
M-c	2462854	5732878	607	Si	No	Si	Si	68	2895
M-d	2458762,5	5732154,2	776	Si	Si	Si	Si	0	1139,037
M-e	2458453,4	5733162,23	833,8	Si	Si	Si	Si	509,93	1883,2
M-f	2461412	5734285	700	Si	Si	Si	Si	93,11	3056,07
HP-a	2430122	5773292	815	Si	Si	Si	Si	23	3974,8
P-a	2474017	5712122	696	Si	Si	Si	Si	150	3420
Q-a	2430537	5755566	611	Si	Si	Si	Si	400	3980
RM-a	2468090,7	5733544,39	655,8	Si	No	Si	No	0	450
RM-b	2476106,19	5731533,12	702,9	Si	No	Si	No	0	450
RM-c	2474259,34	5731360,14	697,5	Si	Si	Si	Si	0	770
RM-d	2468107,05	5725502,79	637,65	Si	No	Si	No	90,68	980,99
RM-e	2472896,9	5727434,17	528,5	Si	Si	Si	Si	81,99	1764,94
RM-f	2466563,58	5727672,98	624,02	Si	No	Si	No	85	699,9
RM-g	2473593,43	5729816,1	602,8	Si	No	Si	No	0	429
RM-h	2479445,44	5734074,09	680,4	Si	No	Si	No	10	1014
RM-i	2479313,06	5734890,93	696,9	Si	Si	Si	No	0	896
V-a	2467995	5765497	1075,5	Si	Si	Si	Si	105	1925,5
SJP1	2430110,5	5769285,5	787,3	Si	Si	Si	Si	0	2730

11.2 Pozos seleccionados para mapear profundidades y espesores de las unidades geológicas observadas

Para mapear las profundidades (m.s.n.m) de los topes y espesores (m) de las formaciones a partir de perfiles eléctricos, se confeccionaron polígonos delimitados por los pozos donde fueron identificados los topes de formación. En la tabla 3 se indican los topes reconocidos en cada pozo.

Tabla 3: Topes formacionales determinados en cada uno de pozos.

Pozos	TOPES DE FORMACION DETERMINADOS EN CADA POZO (X)						
	Grupo Neuquén (Subgrupo Río Limay)			Formación Rayoso	Formación Huitrín	Formación Agrio	Formación Mulichinco
	Formación Cerro Lisandro	Formación Huincul	Formación Candeleros				
AP1			X	X	X	X	X
AP2			X	X	X	X	X
AP8			X	X	X	X	X
BC-a					X	X	X
H-a			X	X	X	X	X
M-a				X	X	X	X
M-b				X	X	X	X
M-c				X	X	X	X
M-d			X	X	X	X	
M-e			X	X	X	X	X
M-f				X	X	X	X
HP-a		X		X	X	X	X
P-a				X	X	X	X
Q-a				X	X	X	X
RM-a			X	X	X	X	X
RM-b	X	X	X	X	X	X	X
RM-c	X	X	X	X			
RM-d			X	X	X	X	X
RM-e		X	X	X			
RM-f			X	X	X	X	X
RM-g		X	X	X	X	X	X
RM-h	X	X	X	X			
RM-i	X	X	X	X			
V-a			X	X	X	X	X
SJP1		X	X	X	X	X	X

11.3 Pases y características de las formaciones en los registros eléctricos

A través de la correlación de los registros eléctricos y de control geológico con el *software* Petrel 2017.4 sobre los 25 pozos en el área de estudio, se interpretaron los pases formacionales. A lo largo y ancho de la zona de estudio se observaron patrones de contraste en los registros eléctricos que ayudaron a interpretar los pases formacionales. Los datos de control geológico no fueron determinantes para definir los pases, sin embargo fueron fundamentales en la descripción litológica de las unidades y sus correlaciones.

11.3.1 Formación Mulichinco

Para el presente trabajo solo se interpretó al tope de la formación para posteriormente realizar descripciones sobre la Fm. Agrio.

El pase a la Fm. Agrio o tope de la Fm. Mulichinco se observa a través de un abrupto aumento en los valores de los registros de rayos gama y de tiempo de tránsito en los perfiles sínicos. Esto marca el contraste entre las areniscas de la Fm. Mulichinco y el material arcilloso de la Fm. Agrio.

11.3.2 Formación Agrio

A partir de las descripciones de control geológico e interpretación de los registros eléctricos se pudo caracterizar a la formación a nivel de miembros (figura 18).

Miembro Pilmatué: Este miembro sobreyace a la Fm. Mulichinco. Desde su base el control geológico muestra intercalaciones de areniscas calcáreas finas a muy finas, arcilitas calcáreas y calizas arenosas/arcillosas. Hacia el este del área de estudio solo se describen intercalaciones de areniscas finas a muy finas con arcilitas y limolitas grises hasta el límite con el Mb. Avilé o Agua de la Mula.

Miembro Avilé: el control geológico del pozo PH-a describe un nivel de 10 m de espesor de areniscas gruesas que podría corresponder a esta unidad ya que se ubica inmediatamente por debajo de la base del Mb. Agua de la Mula.

Miembro Agua de la Mula: en el área de estudio el control geológico describe al miembro a partir de una secuencia basal de arcilitas y limoarcilitas grises de aproximadamente 100 m a la que le continúan intercalaciones con areniscas grises muy finas hacia el tope con la Fm. Huitrín. El contenido arenoso de estas intercalaciones aumenta de oeste a este.

El límite entre los miembros Pilmatué y Agua de la Mula correspondería al intervalo basal transgresivo TST propuesto por Spalletti et al. 2001, donde se observó una sección de aproximadamente 100 m con valores altos y constantes de rayos gamma (153 gAPI) y de tiempo de tránsito (80 μ s/ft). Este patrón es observable en todos los registros de pozo de la zona de estudio y se ilustra en la figura sobre el pozo SJP1.

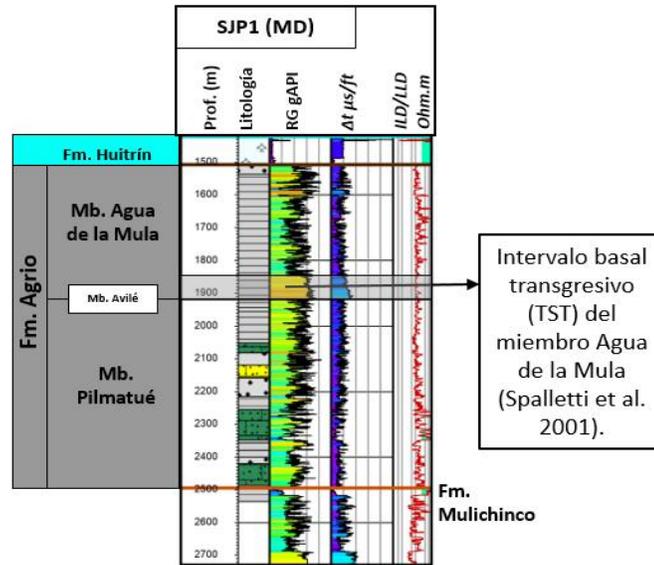


Figura 18: Representación de la Fm. Agrío en el pozo SJP1 donde se destaca el intervalo basal transgresivo (TST) del Mb. Agua de la Mula.

11.3.3 Formación Huitrín

Los datos de control geológico indican que al oeste del área de estudio, donde la formación es más espesa, está conformada por halita, yeso, anhidrita y calizas, mientras que al este solo se describieron finos niveles de anhidrita y yeso hasta desaparecer en el borde oriental de la zona estudiada.

Los registros eléctricos para la Fm. Huitrín marcan valores de tiempo de tránsito y rayos gamma muy bajos, mientras que el perfil resistivo presenta valores muy elevados. Estas mediciones se corresponden con unidades rápidas y compactas como lo son las evaporitas. Estas propiedades físicas en las evaporitas permitieron diferenciar a la Fm. Huitrín de sus unidades infrayacente (Fm. Agrío) y suprayacente (Fm. Rayoso), dado que estas poseen valores de rayos gamma y tiempo de tránsito elevados junto a bajas resistividades en los límites con la Fm. Huitrín (figura 19).

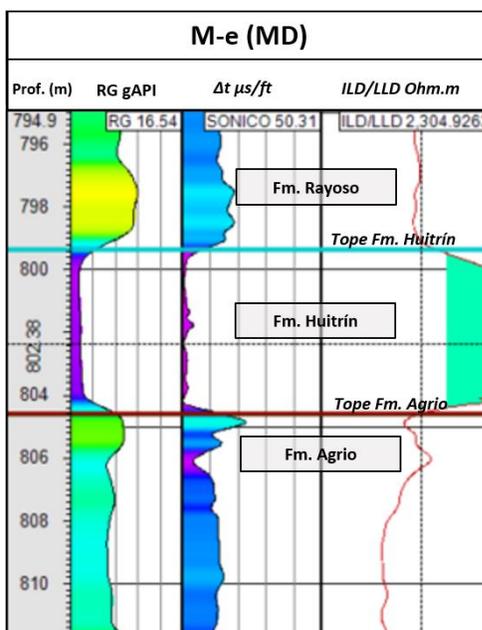


Figura 19: Características de los registros eléctricos de la Fm. Huitrín en el pozo M-e, donde se observan los contrastes en valores de registros con respecto a las formaciones Agrio y Rayoso.

11.3.4 Formación Rayoso

Las descripciones de control geológico en los pozos ubicados al noroeste de la zona estudiada indican que, Inmediatamente por sobre las evaporitas de la Fm. Huitrín, se acomoda un paquete de aproximadamente 358 m de intercalaciones de delgados niveles de yeso con arcilitas y limolitas. Este nivel podría corresponder al Mb. Salina, unidad basal de la Fm. Rayoso según las subdivisiones estratigráficas propuestas por Herrero Ducloux (1945) y Zavala et al. (2006) las cuales que fueron utilizadas en este trabajo (figura 20). Por encima se observan alternancias de areniscas medianas a finas, areniscas arcillosas, arcilitas y limolitas, con aislados y delgados niveles de yeso hacia el tope que dejan de observarse en dirección sureste del área de estudio.

Las descripciones correspondientes al Mb. Salina no fueron observables en el resto del área de estudio, lo que podría suponer que este miembro no se encuentra presente en la zona del DCh y ámbito norte de la Dorsal de Huincul. En estas zonas, la base de la formación tiene unos 200 m de arcilitas con areniscas finas de matriz arcillosa, que denotan valores bajos de resistividad, y elevados valores de rayos gamma y tiempo de tránsito. Le sigue un aumento progresivo en el contenido de areniscas que le confiere propiedades acuíferas a la formación por encima de la base arcillosa. En este tramo superior existen varios niveles con registros de rayos gamma bajos y elevada resistividad, donde se describieron unidades hidrogeológicas.

El pase a la Fm. Candeleros se determinó al observar una abrupta caída en los valores de registros de rayos gamma y sónico en donde se encuentra la discordancia Intersenoniana. Al sureste del área de estudio se observó que este límite también se coincide con un abrupto descenso en la resistividad, como se ilustra en figura 21 correspondiente al pozo RM-i.

La formación posee afloramientos en el área de central de la zona de estudio, donde es notoria la erosión fluvial del río Neuquén, que habría removido a sedimentos del Gr. Neuquén. También se encuentra aflorando en la zona de Las Cárceles en el flanco este del DCh.

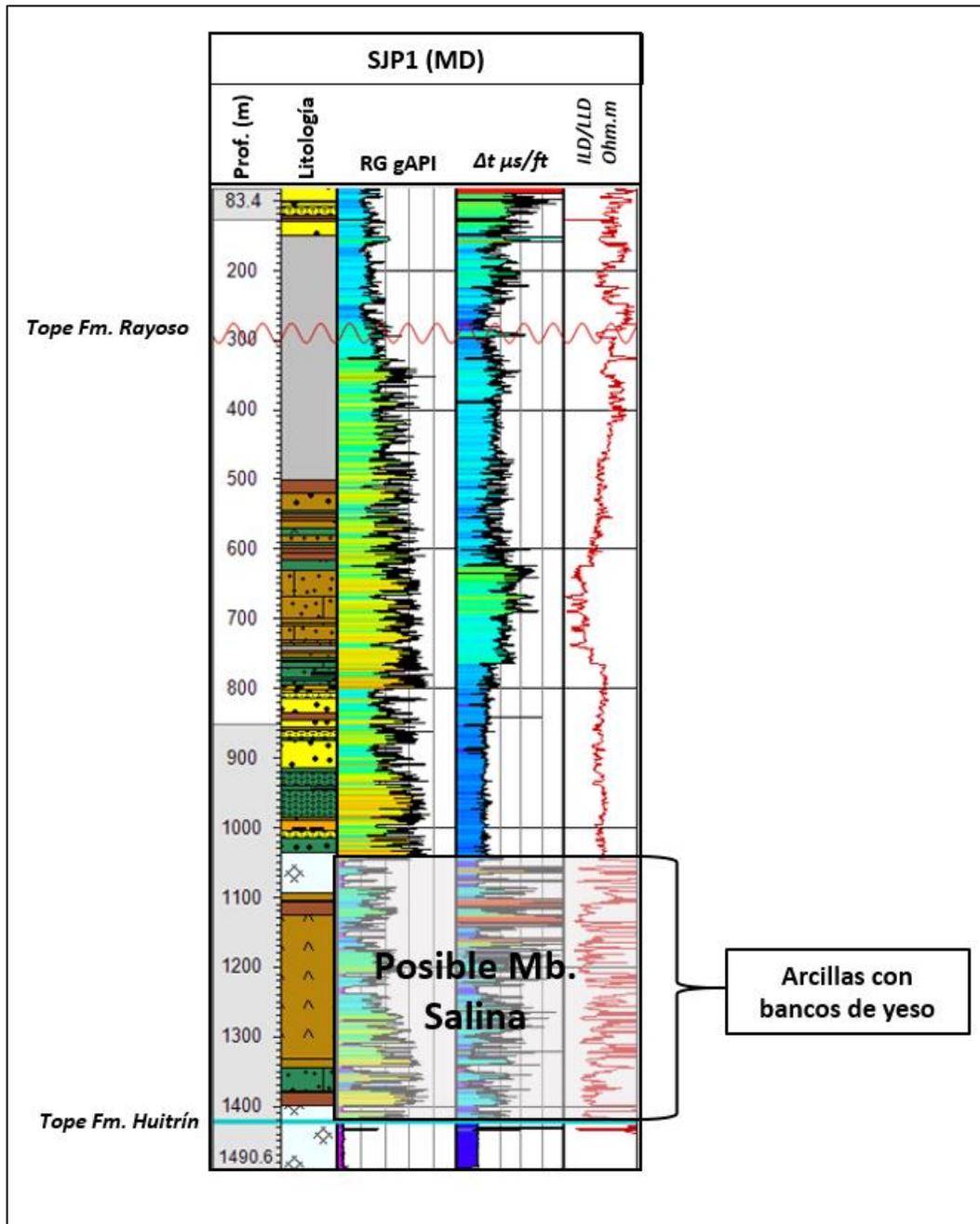


Figura 20: Perfil de la Fm. Rayoso en el pozo SJP1 donde se resalta al Mb. Salinas

11.3.5 Grupo Neuquén (Subgrupo Río Limay)

Se observaron descripciones litológicas de las formaciones Candeleros y Huincul. La Fm. Cerro Lisandro pudo ser interpretada a partir de registros eléctricos y con la ayuda de la Hoja Geológica Zapala 3969-I georreferenciada sobre imágenes satelitales.

Los afloramientos del Gr. Neuquén pertenecen, en su mayoría a depósitos de la Fm. Candeleros que cubren el área del DCh. En menor medida afloran depósitos de las formaciones Huincul y Cerro Lisandro al sureste del área de estudio.

11.3.5.1 Formación Candeleros

Las descripciones de control geológico describen que la Fm. Candeleros se inicia con un paquete de 25 m areniscas conglomerádicas con matriz arcillosa sucedidas por un paquete de aproximadamente 140 m de areniscas medias a gruesas de menor matriz arcillosa.

Los registros eléctricos medidos en el pozo RM-i muestran un promedio de rayos gamma de 54 gAPI y 80 $\mu\text{s}/\text{ft}$ de tiempo de tránsito, dando a entender que la formación tiene bajo contenidos de arcillas, es compacta y baja permeabilidad.

Se estableció el pase con la Fm. Huincul en un intervalo de unos 5 m de espesor de baja velocidad sónica que contrasta con los sedimentos por debajo y por encima, que además coincide con un aumento en el nivel de rayos gamma y una disminución de la resistividad (figura 21). Este intervalo se corresponde con la base arcillosa de la Fm. Huincul descrita por Pons et al. (2011) en afloramientos de Huincul al sureste del área de estudio.

11.3.5.2 Formación Huincul

El control geológico la describe el inicio con arcilitas castaño rojizas seguido por niveles de areniscas finas a medias y gruesas con baja matriz arcillosa poco consolidadas, intercaladas con limoarcilitas castaño rojizas.

En los registros eléctricos se observa una alternancia de rayos gamma limpio y sucio con un aumento de este último hacia el tope. En cuanto al registro sísmico se observa un gradual aumento del tiempo de tránsito hasta el límite con la Fm. Cerro Lisandro.

El pase con la Fm. Cerro Lisandro se estableció al comienzo de una gruesa secuencia de depósitos que arrojan altos valores de rayos gamma que promedian los 100 gAPI (figura 21) por encima de la

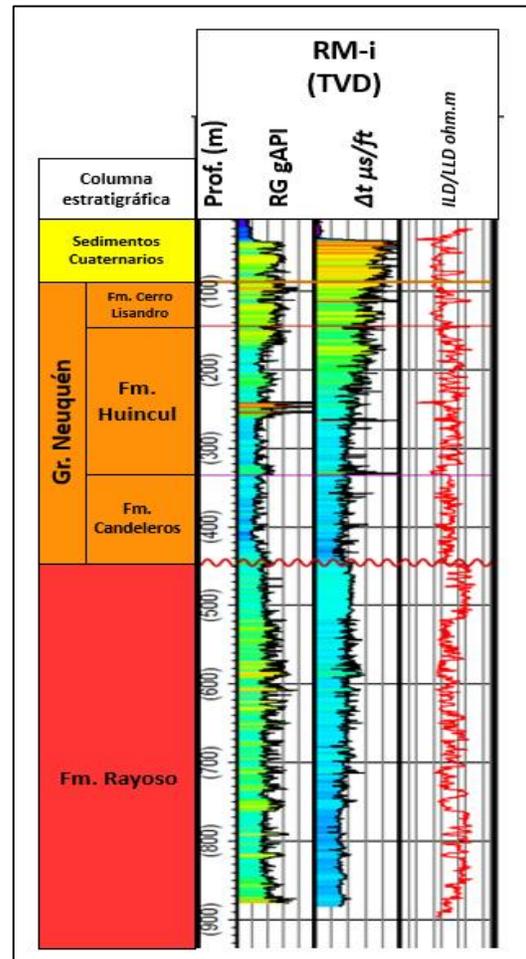


Figura 21: Vista TVD de los registros RG, Sónico y ILD/LLD en el pozo RM-i donde se observan los criterios para la determinación de los topes de la Fm. Rayoso y formaciones del Gr. Neuquén.

Fm. Huincul. Se debe aclarar que el límite entre estas es transicional cuando en la Fm Huincul predominan arcillitas y limoracillitas hacia el tope.

11.3.5.3 Formación Cerro Lisandro

Solo pudo ser identificada en pozos al sureste del DCh. Su mayor espesor se ve en el pozo RM-i con 57 m. desde allí la formación se adelgaza, en dirección centro sur del área, hasta no ser registrada.

Los registros eléctricos la muestran como una capa con rayos gamma y tiempos de tránsito constantes y muy elevados, que se asocian con confianza a los depósitos arcillosos característicos de la formación.

11.4 Transectas

A partir de la información disponible se trazaron cinco transectas (figura 22) con el objetivo principal de analizar las variaciones laterales y verticales de las unidades litolestratigráficas interpretadas.

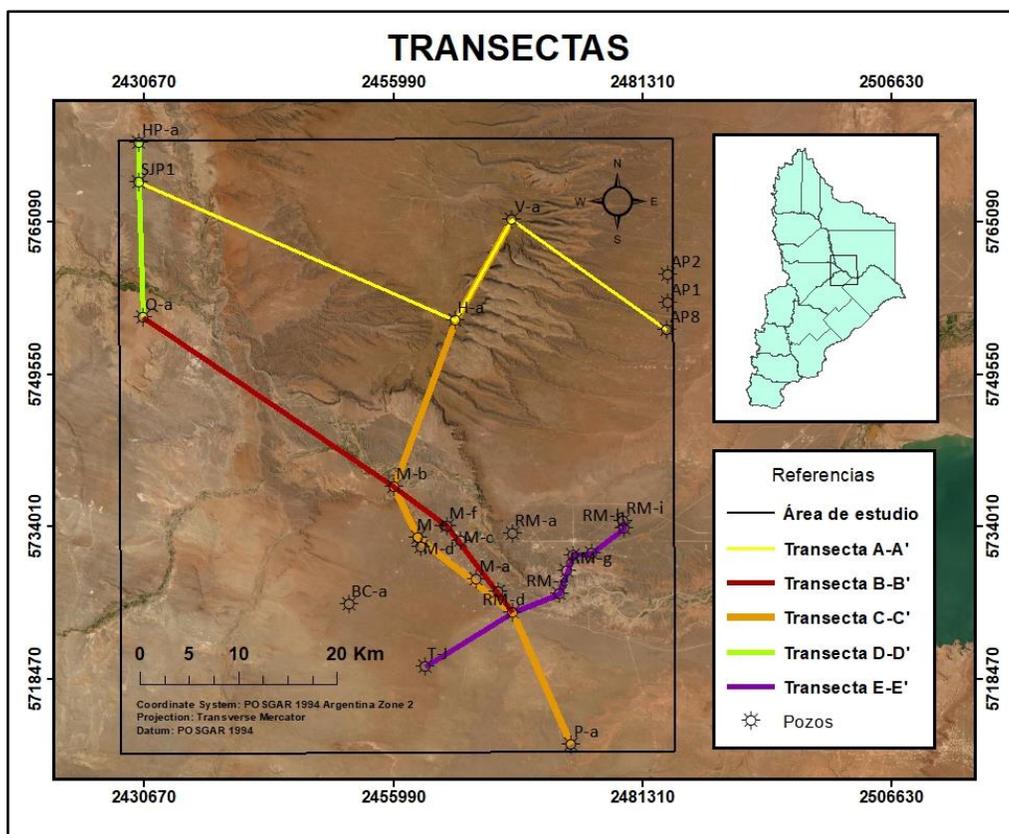


Figura 22: Ubicación de las transectas analizadas dentro del área de estudio.

11.4.1 Transecta A-A'

El corte transversal se ubica al norte de la zona de estudio con dirección oeste-este (figura 23). En la transecta se puede observar la estructura anticlinal del Dorso de los Chihuidos de oeste a este (figura 24). Las formaciones se encuentran a mayor profundidad al oeste de la transecta donde también poseen mayor espesor. La Fm. Agrio no sufre mayores variaciones de espesor. La Fm. Huitrín reduce su espesor hasta desaparecer al este de la transecta. La Fm. Rayoso solo reduce su espesor hacia el este por la ausencia del Mb. Salinas. El Gr. Neuquén está representado por la Fm. Candeleros, la cual mantiene su espesor, y por la Fm. Huíncul que solo se observó en el pozo SJP1.

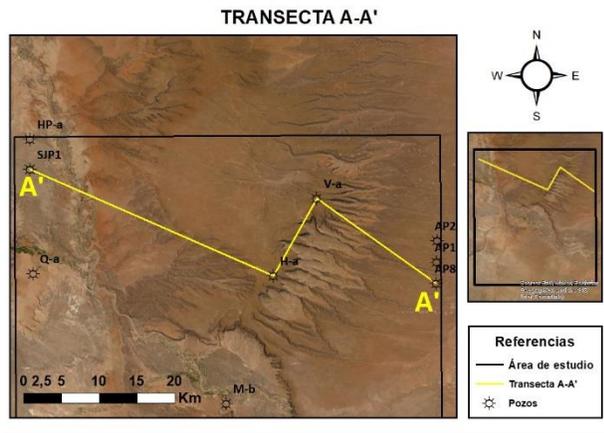


Figura 24: Ubicación de la Transecta A-A'

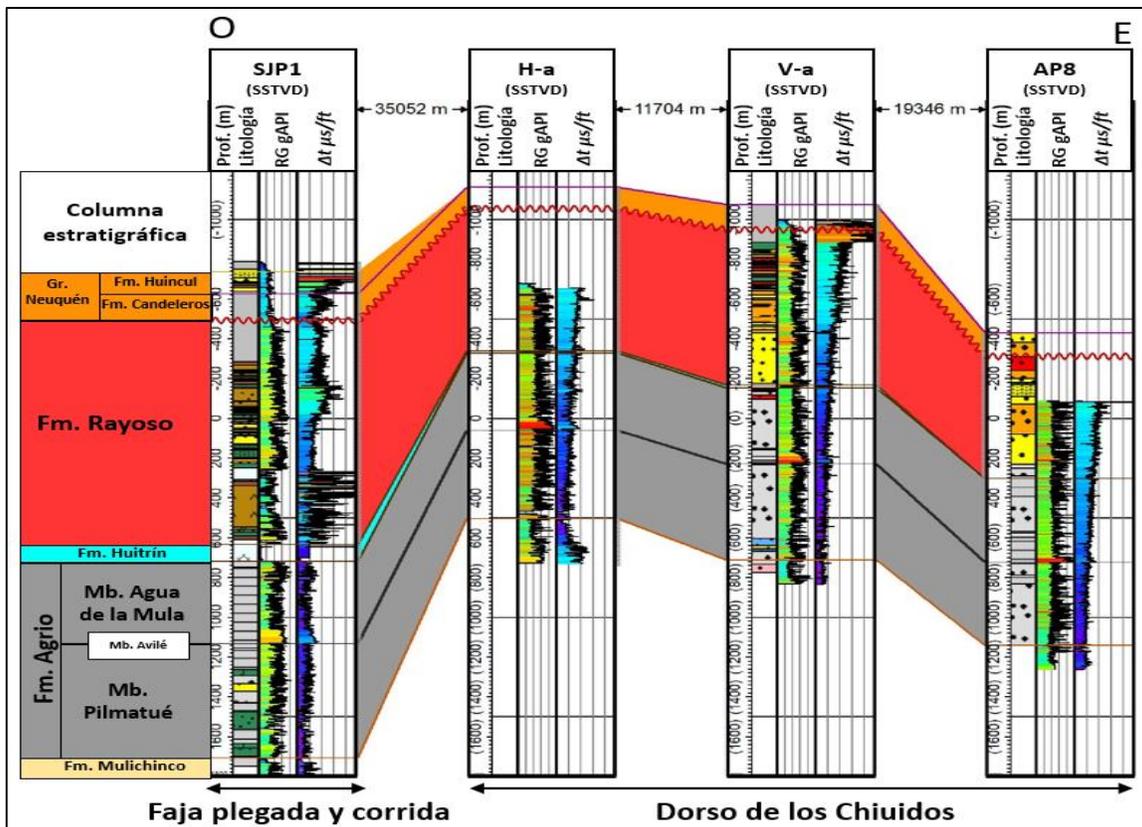


Figura 23: Vista en SSTVD de la Transecta A-A' con dirección O-E. Se pueden observar los perfiles de Rayos Gamma (RG), sónico (Δt) y litologías por recortes de perforación.

11.4.2 Transecta B-B'

Esta sección bordea el margen derecho del río Neuquén, en dirección noroeste-sureste, desde el pozo Q-a ubicado sobre la FPC hasta el pozo RM-d (figura 25). Al igual que la transecta A-A' las unidades litoestratigráficas se adelgazan hacia el este. La posición de esta transecta permite observar un perfil de la estructura del Anticlinal del Cerro Mangrullo (figura 26).

En el pozo M-b se observa que el Gr. Neuquén y parte de la Fm. Rayoso se encuentran ausentes por erosión fluvial del río Neuquén.

En el sector sureste de la transecta las descripciones de control geológico describen que existen 100 m de conglomerados que de acuerdo a la Hoja Geológica Zapala 3969-I corresponderían a depósitos cuaternarios.

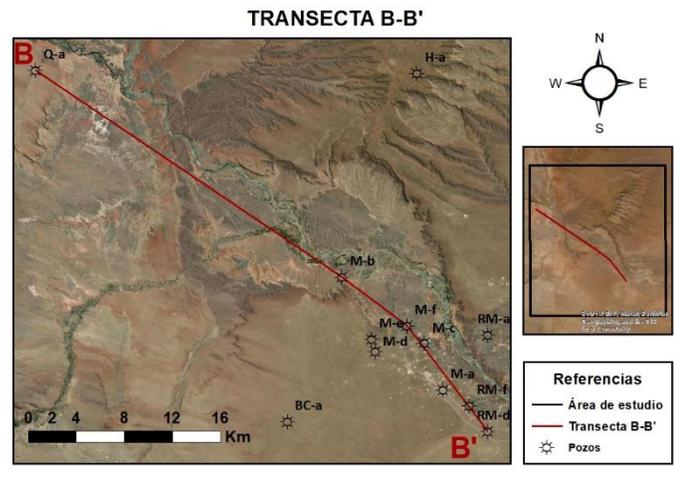


Figura 25: Ubicación de la Transecta B-B'

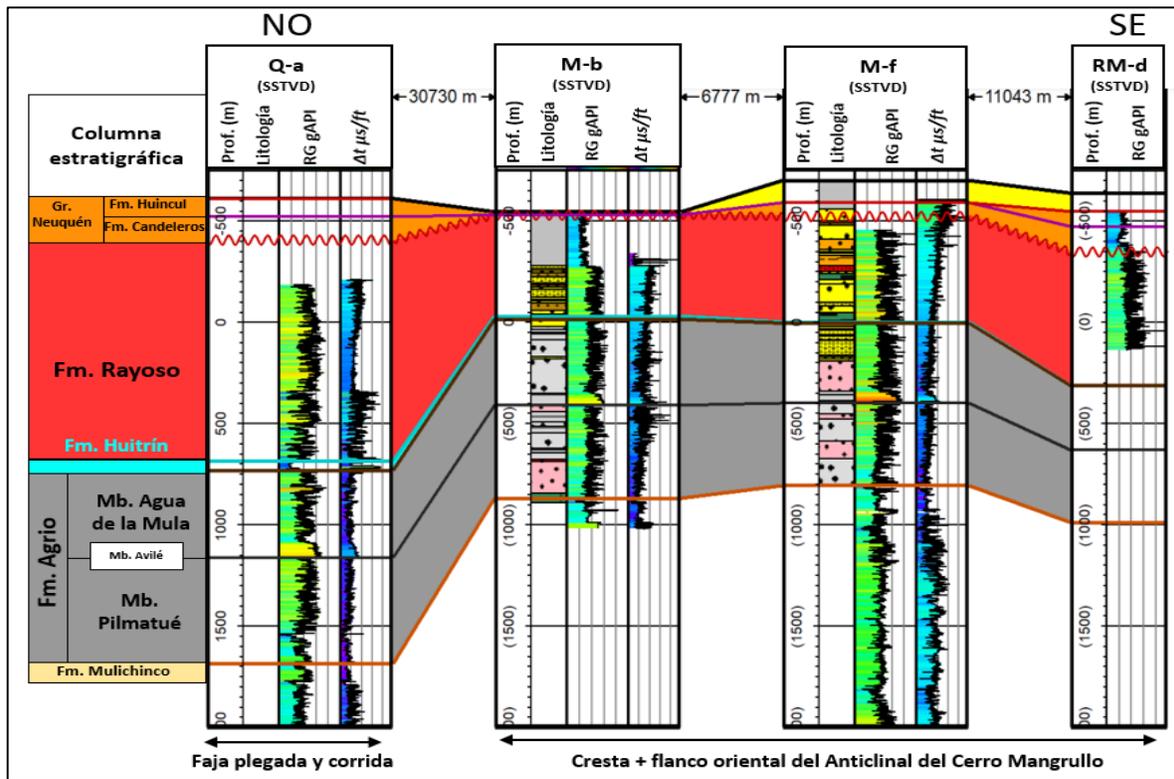


Figura 26: Vista SSTVD de la Transecta B-B' sobre el margen derecho del río Neuquén. Se observan, de izquierda a derecha, el registro geológico y los perfiles de tiempo de tránsito (Δt) y rayos gamma. En amarillo se resaltan depósitos Cuaternarios.

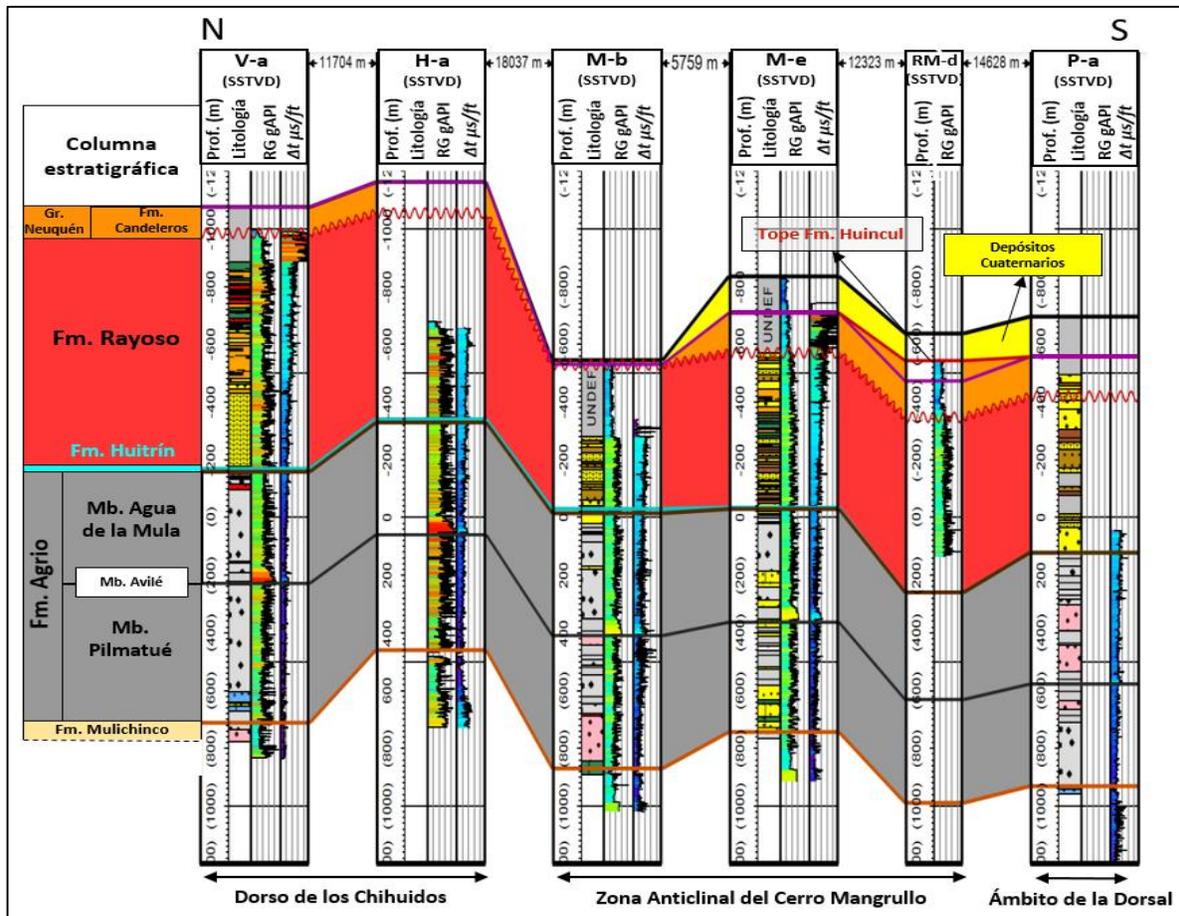


Figura 28: Vista SSTVD de la transecta C-C' en el centro del área de estudio. Se observan, de izquierda a derecha, el registro geológico junto con los perfiles de tiempo de tránsito (Δt) y rayos gamma.

11.4.4 Transecta D-D'

Esta transecta de rumbo noroeste-suroeste se ubica sobre Pampa Amarga Grande dentro de la FPC, al noroeste de la zona de estudio (figura 29). Se observa una reducción de espesor hacia el sur de las unidades, siendo la Fm. Huitrín la que sufre un mayor adelgazamiento (figura 30). Los topes de la Fm. Rayoso y Gr. Neuquén en el pozo Q-a se estimaron teniendo en cuenta la tendencia y dirección de adelgazamiento de las formaciones en otros pozos solo para los fines del presente trabajo, ya que en el tramo superior de este pozo no se contó con registros eléctricos ni de control geológico.

Los depósitos situados por encima del Gr. Neuquén en los pozos HP-a y SJP1 corresponderían a depósitos cuaternarios atribuidos a niveles de base de antiguos cursos fluviales, según la carta Geológica Zapala 3969-I. El espacio de acomodación para estos depósitos fue generado por el alto estructural observado en el pozo SJP1.

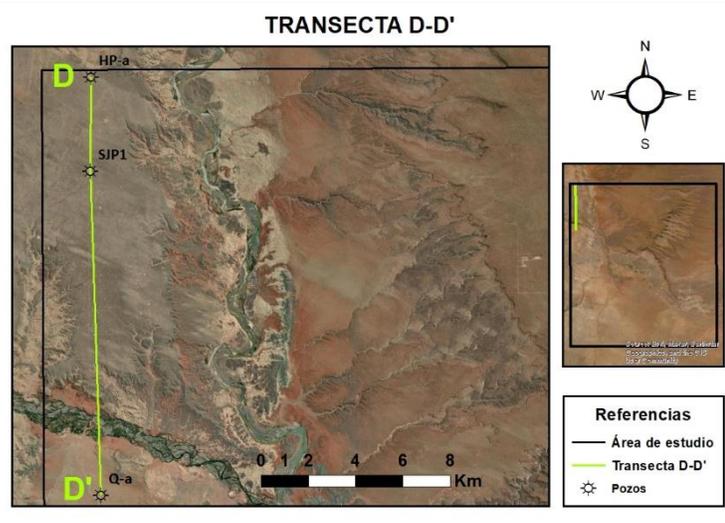


Figura 29: Ubicación de la Transecta D-D'

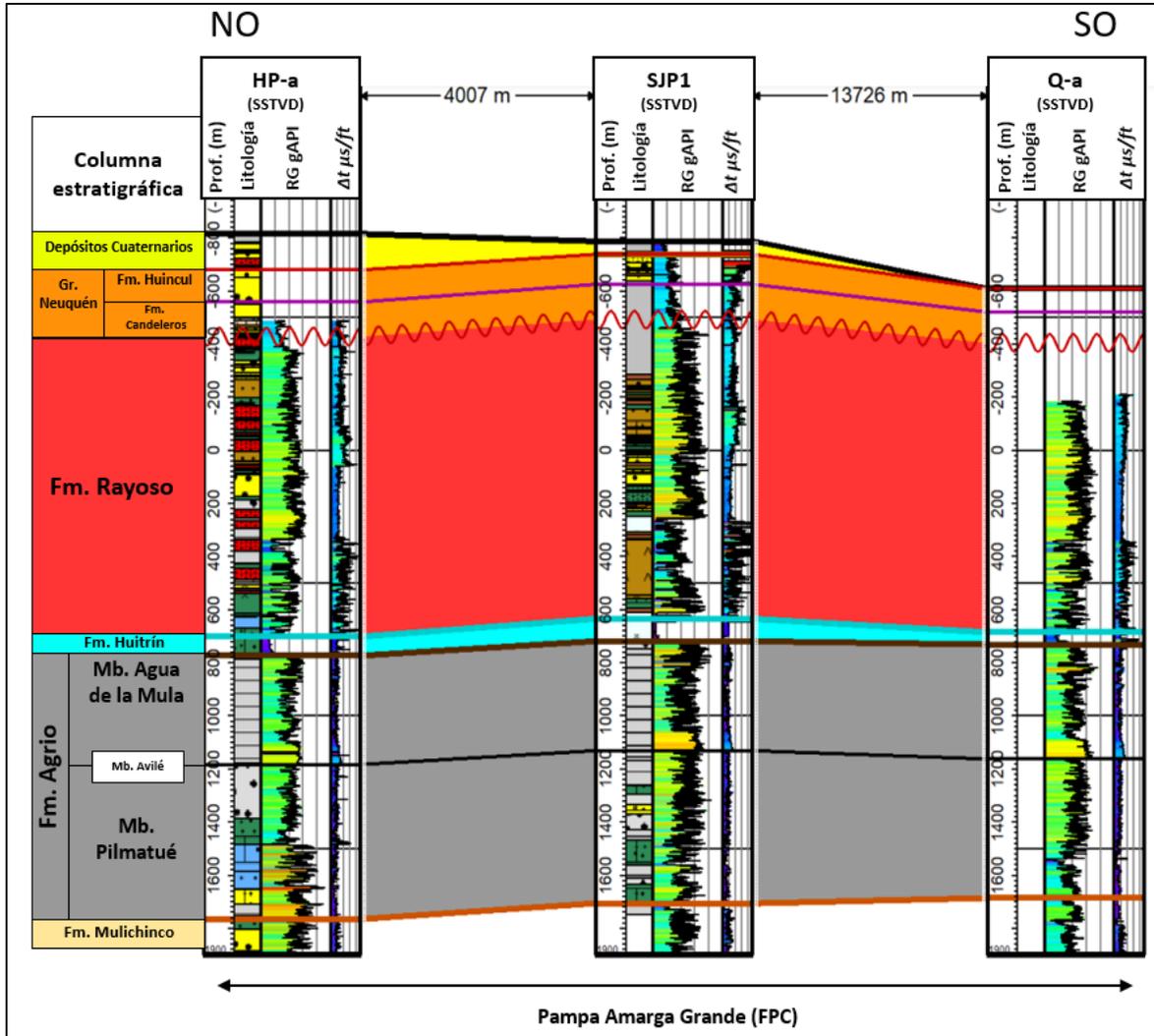


Figura 30: Vista SSTVD de la Transecta D-D' en la zona de la FPC dentro del área de estudio. Obsérvese una disminución generalizada de los espesores en dirección sur.

11.4.5 Transecta E-E'

Este es un corte perpendicular a la dirección de flujo del río Neuquén al sur este del área de estudio (figura 31). Se decidió representar la columna litoestratigráfica desde la Fm. Rayoso ya que los registros eléctricos comienzan, en su mayoría desde dentro de la formación. El tope de la Fm. Agrio solo se observa en los registros del pozo RM-e, mientras que para el resto de los pozos el tope de la formación se ubicó según el control geológico.

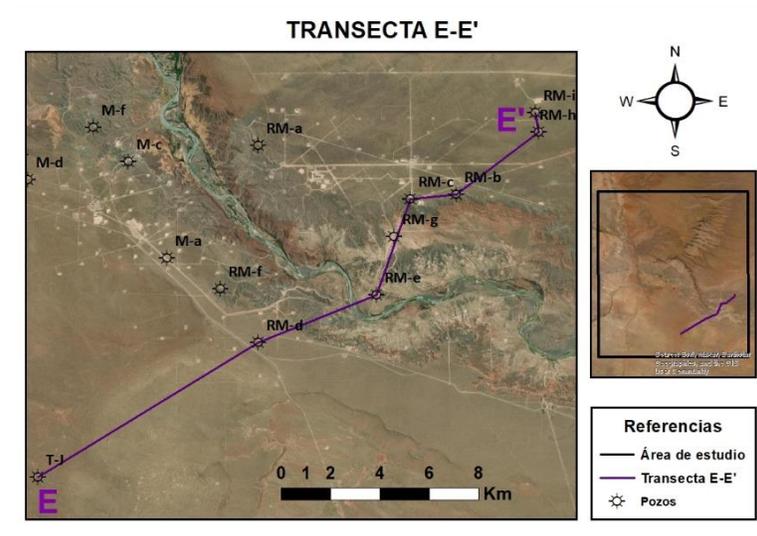


Figura 31: Ubicación de la Transecta E-E''

La transecta se dividió en dos sectores correspondientes a cada uno de los márgenes del río Neuquén. Desde el margen izquierdo, en dirección noreste se denota un aumento considerable de los espesores de cada una de las formaciones del Subgrupo Río Limay. Por encima se localizan depósitos cuaternarios que también se engrosan en dirección noreste.

Desde el margen derecho del río Neuquén hacia el extremo suroeste, se observa que el Gr. Neuquén está representado por las formaciones Candeleros y Huincul seguidas por depósitos cuaternarios que se adelgazan en la misma dirección. En el pozo TJ-1 se observa un levantamiento de la columna litoestratigráfica como consecuencia de su proximidad a la Dorsal de Huincul cercana al centro de esfuerzos de la Dorsal de Huincul.

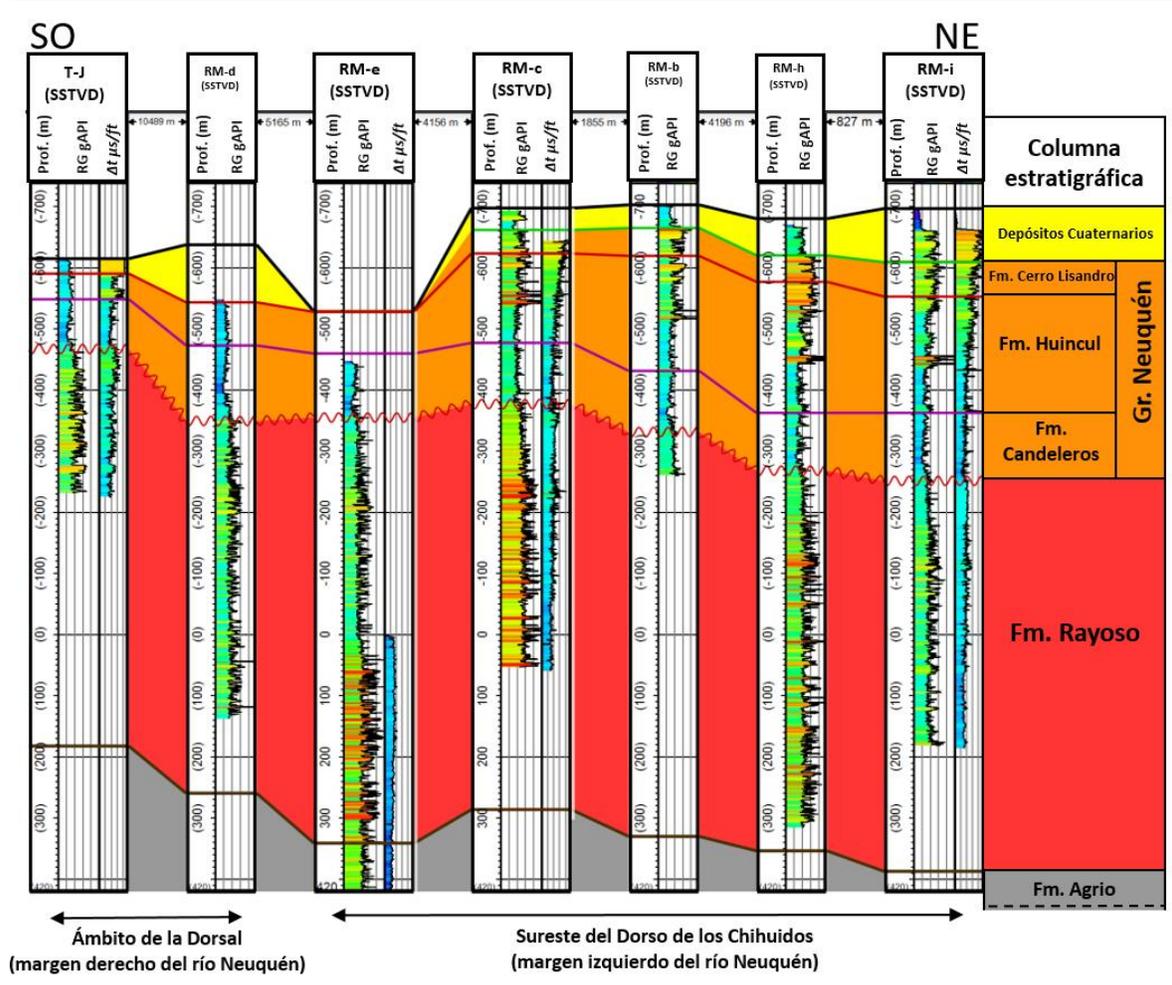


Figura 32: Vista SSTVD de la transecta E-E' donde se observa un engrosamiento del Gr. Neuquén, un adelgazamiento de la Formación Rayoso en dirección NE.

11.5 Mapas Estructurales

Mediante el *software* Petrel 2017.4 se realizaron los mapas estructurales interpolando los topes de las formaciones Mulichinco, Agrio, Huitrín y Rayoso interpretados en los pozos. No se generaron mapas estructurales individuales para las formaciones Candeleros, Huincul y Cerro Lisandro, ya que en la zona de estudio las formaciones Huincul y Cerro Lisandro tienen muy baja distribución areal, por lo que se realizó el mapa estructural del Gr. Neuquén tomando los topes de las formaciones Candeleros, Huincul o Cerro Lisandro que se consideraron como techo de la unidad según su presencia.

11.5.1 Tope de la Formación Mulichinco

La formación tiene su punto más alto a -500 m.s.n.m sobre el DCh en el pozo H-a, este punto coincide con parte del eje del Anticlinal del Cerro Mangrullo. Desde allí el tope de Mulichinco se profundiza tanto hacia el oeste (-1800 msnm) como al este (-1100 msnm). La profundización hacia el oeste se observa más abrupta en cuanto se adentra en la FPC al oeste de la zona de estudio. Hacia el sur la profundización es menor, y sufre un leve levantamiento en el área de los pozos BC-a, M-d y M-e a los -800 msnm.

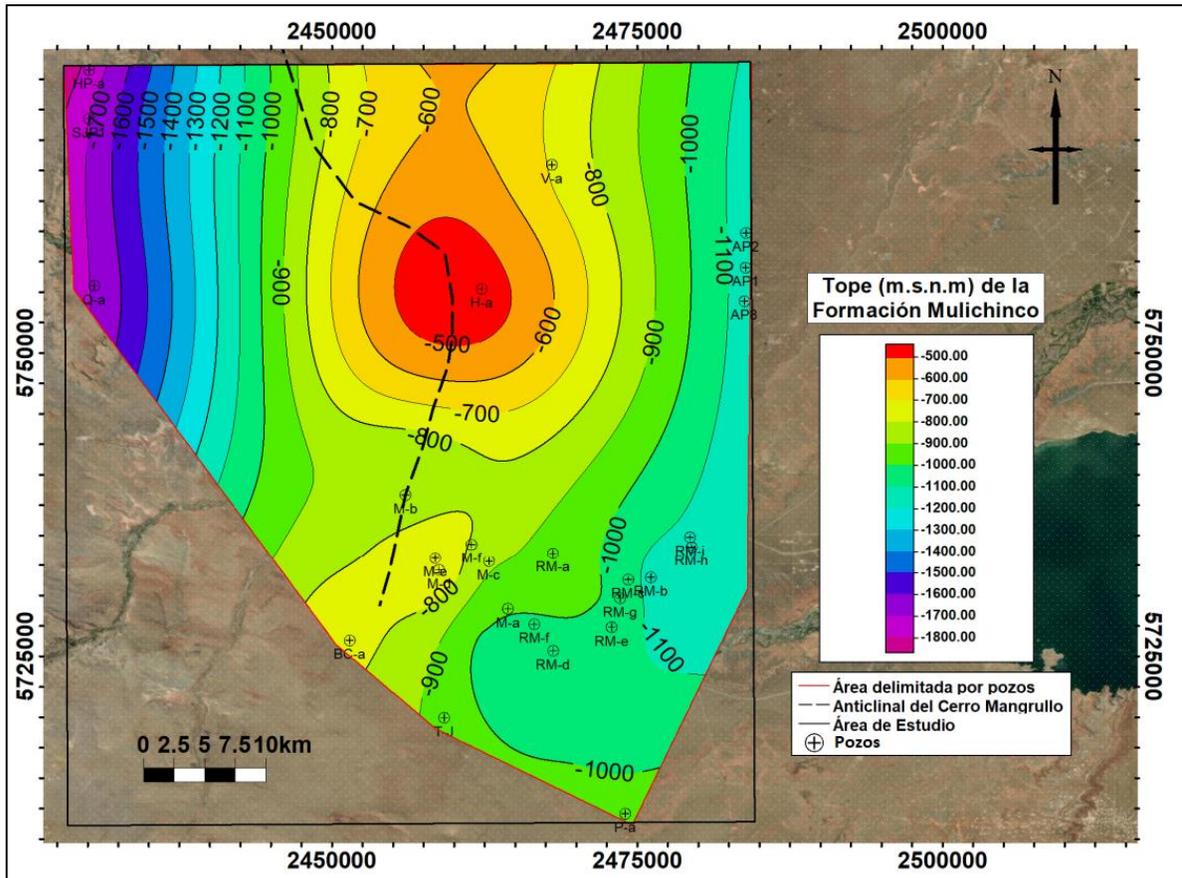


Figura 33: Mapa estructural de la Formación Mulichinco medido en m.s.n.m.

11.5.3 Tope de la Formación Huitrín

Al igual que la Fm. Agrio, la Fm. Huitrín tiene un mayor ángulo de profundización al oeste de la zona estudiada donde alcanza los -700 msnm, mientras que hacia el este se profundiza con menor pendiente hasta desaparecer en el área de Rincón de Mangrullo y flanco este del DCh a una profundidad de entre -300 y -400 m.s.n.m.

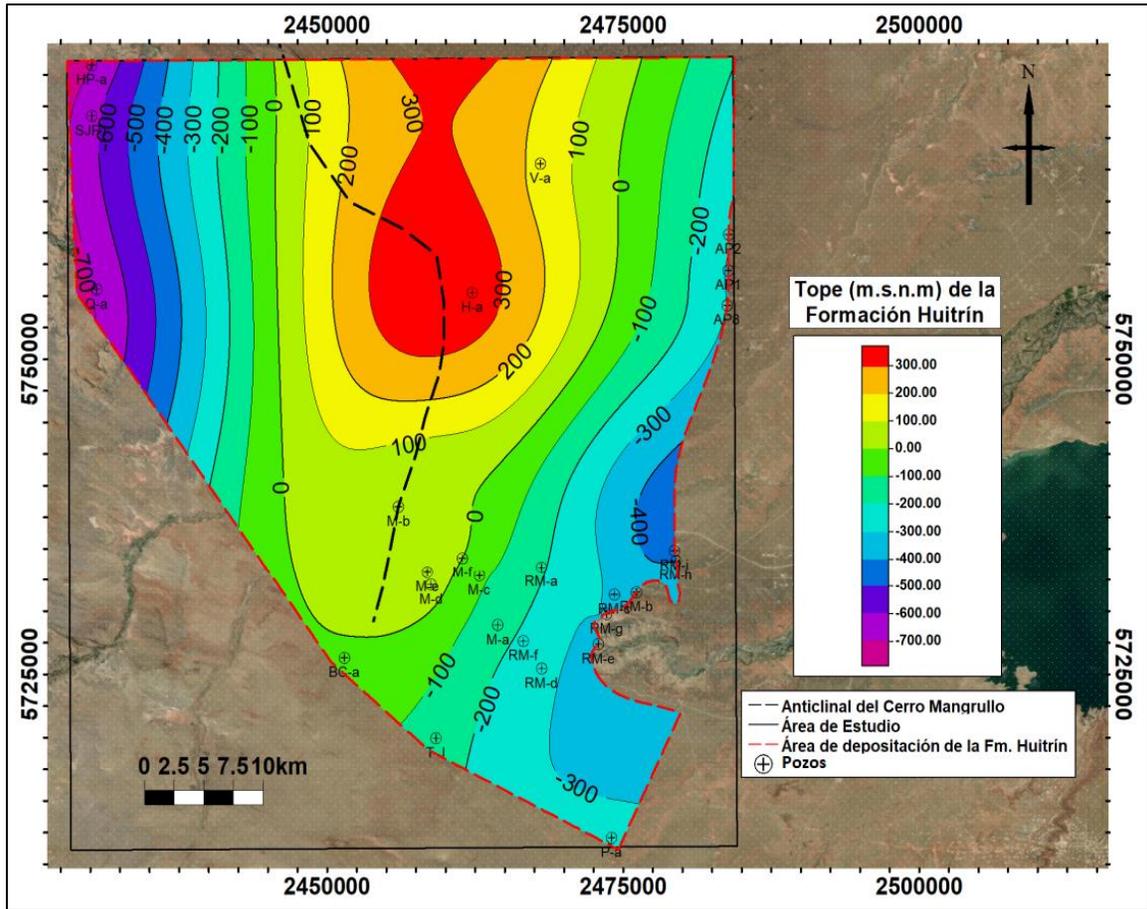


Figura 35: Mapa estructural del tope de la Formación Huitrín.

11.5.4 Tope de la Formación Rayoso

Para generar el mapa estructural de esta unidad, se agregaron 3 puntos de observación de sus afloramientos a partir de imágenes satelitales de Google Earth en el área de Las Cárceles, con el objetivo de mejorar la precisión del mapa estructural en esa zona.

La Fm. Rayoso tiene su punto más alto a 1000 m.s.n.m sobre el DCh. Luego se profundiza de manera pronunciada hasta el borde del flanco este de la estructura a 500 m.s.n.m. y hasta los 200 m.s.n.m. al sureste del área de estudio. Desde el centro del DCh en dirección a la FPC la formación mantiene un cierto ángulo de soterramiento que termina por ubicarla a 400 m.s.n.m.

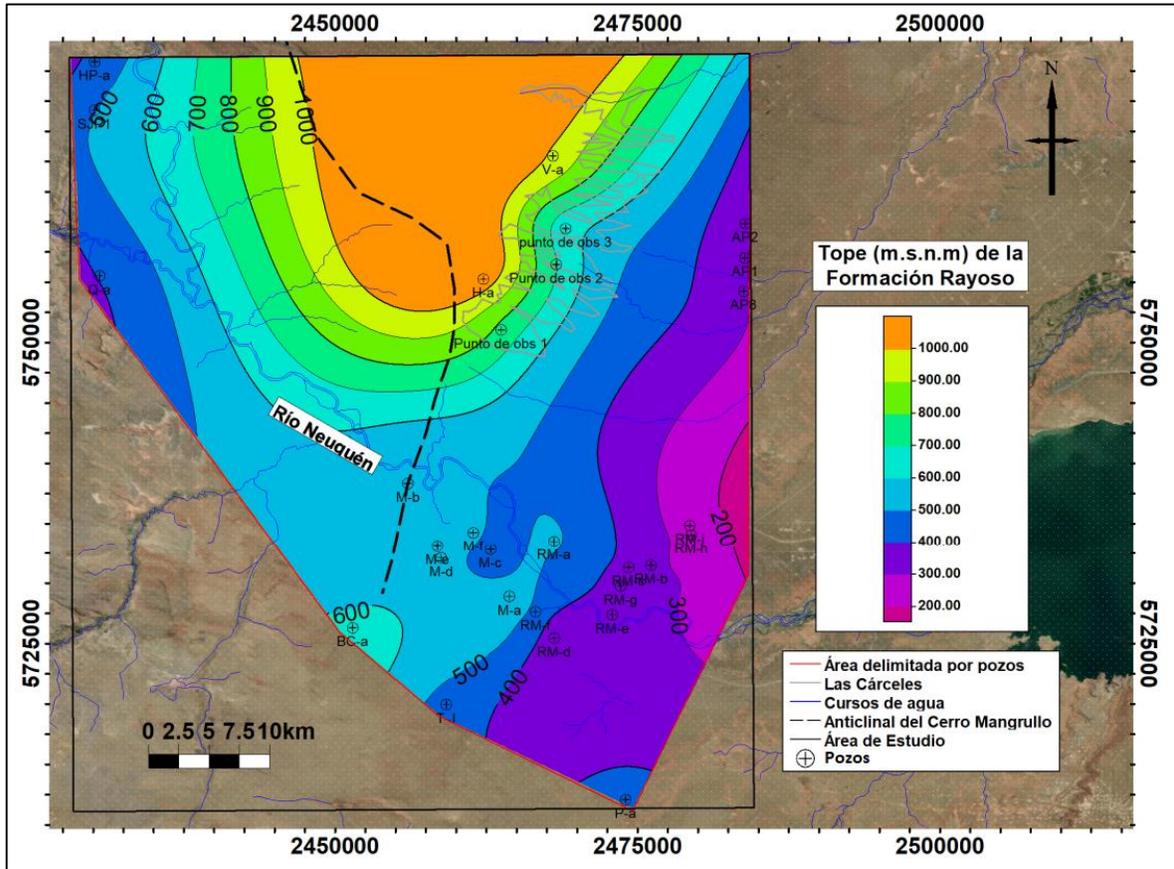


Figura 36: Mapa estructural del tope de la Formación Rayoso.

11.5.5 Tope del Grupo Neuquén (Subgrupo Río Limay)

Se utilizó la cota en m.s.n.m del “punto de observación 4” (figura 37) donde aflora el tope de la Fm. Candeleros, al sureste del DCh, con el objetivo de mejorar la interpolación del mapa estructural.

El tope del Gr. Neuquén se profundiza hacia ambos flancos del DCh. Hacia el oeste lo hace de forma gradual hasta los 600 m.s.n.m y está dado por el tope de la Fm. Candeleros sobre el DCh y la Fm. Huincul en el área de la FPC. En dirección este el tope está dado por la Fm. Candeleros que se profundiza hasta los 500 m.s.n.m en el área los pozos AP1, AP2 y AP8.

En el sector sureste del área delimitada por pozos, el tope del Gr. Neuquén alcanza los 600 m.s.n.m y está referido a los topos de la Fm. Huincul y Cerro Lisandro.

Al sur del polígono Gr. Neuquén el techo del mismo se ubica desde los 500 m.s.n.m, en cercanías al río Neuquén, hasta los 700 m.s.n.m cerca del pozo BC-a. En esta zona el tope del Gr. Neuquén está referido al techo de la Fm. Candeleros y en menor medida al de la Fm. Huincul.

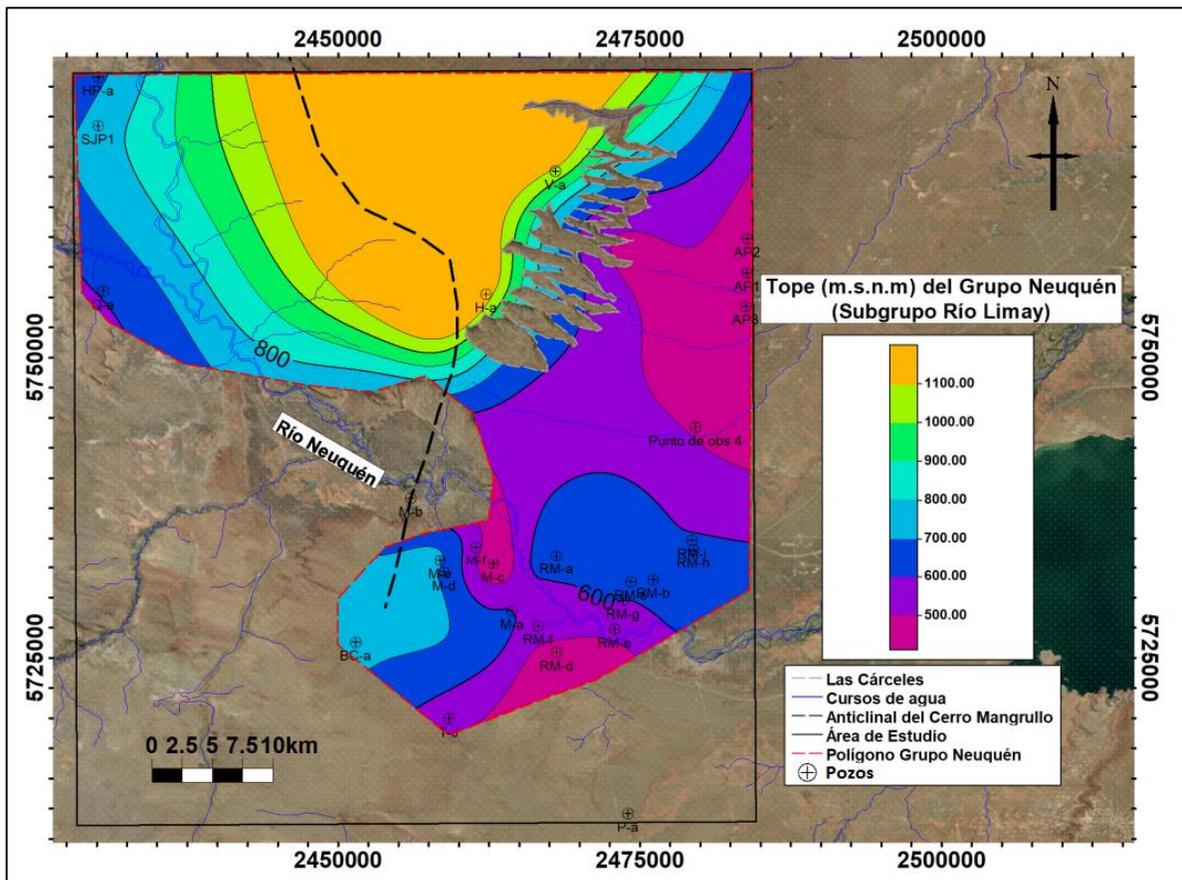


Figura 37: Mapa estructural del Tope del Grupo Neuquén.

11.6 Mapas isopáquicos

Una vez establecidos los topes de las formaciones en subsuelo se confeccionaron mapas isopáquicos con el *software* Petrel 2017.4. El método consistió en mapear la diferencia entre los mapas estructurales de las formaciones de manera contigua, por ejemplo: el espesor de la Fm. Agrio se logró mapeando la diferencia entre la superficie estructural del techo de la misma con la superficie estructural de la Fm. Mulichinco que subyace a Agrio.

11.6.1 Formación Agrio

Dentro del área delimitada por los pozos la Fm. Agrio en general tiene buena continuidad lateral y posee espesor máximo de aproximadamente 1000 m al noroeste, hasta los 700 m al sureste.

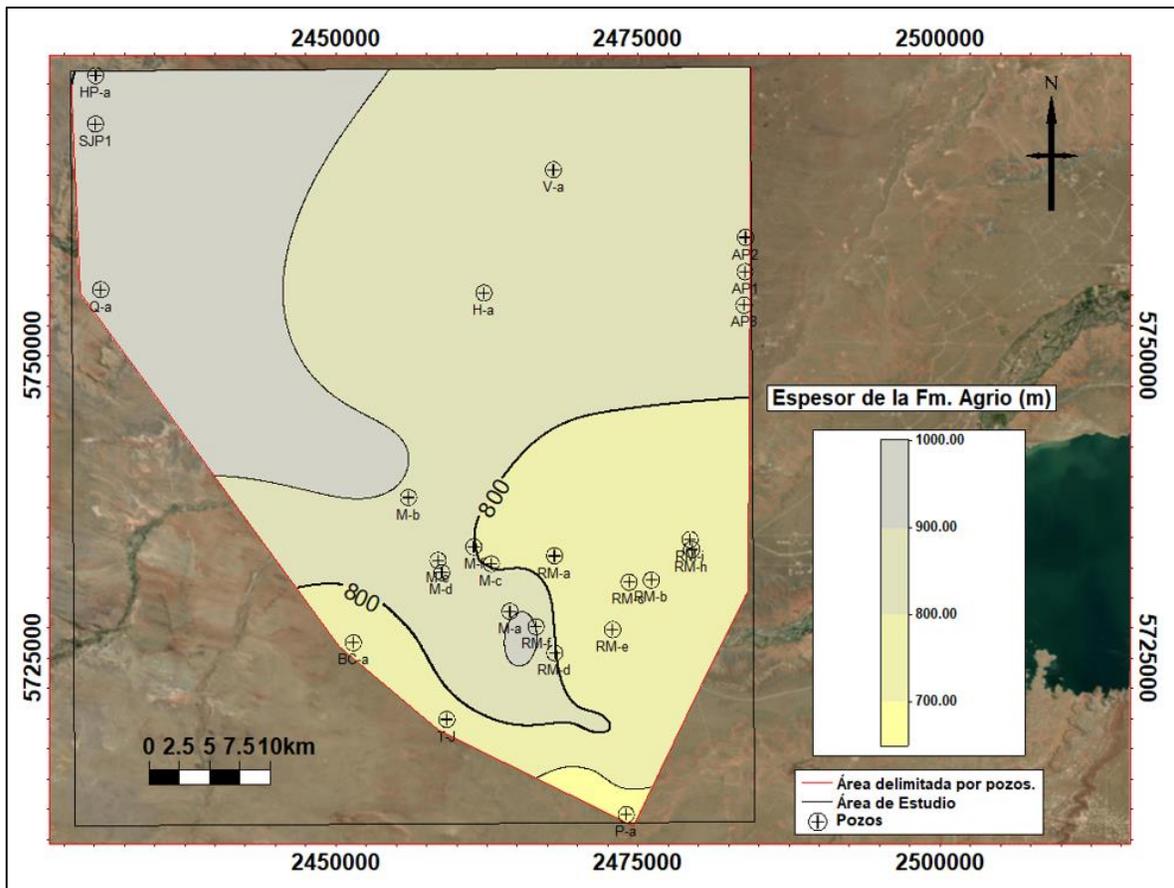


Figura 38: Mapa isopáquico de la Fm. Agrio. Se observa una tendencia de adelgazamiento hacia el sureste.

11.6.2 Formación Huitrín

La Fm. Huitrín muestra un espesor máximo de aproximadamente 90 m en los pozos ubicados en el área de la FPC al oeste. Desde allí la formación reduce su espesor en dirección este y sureste hasta desaparecer.

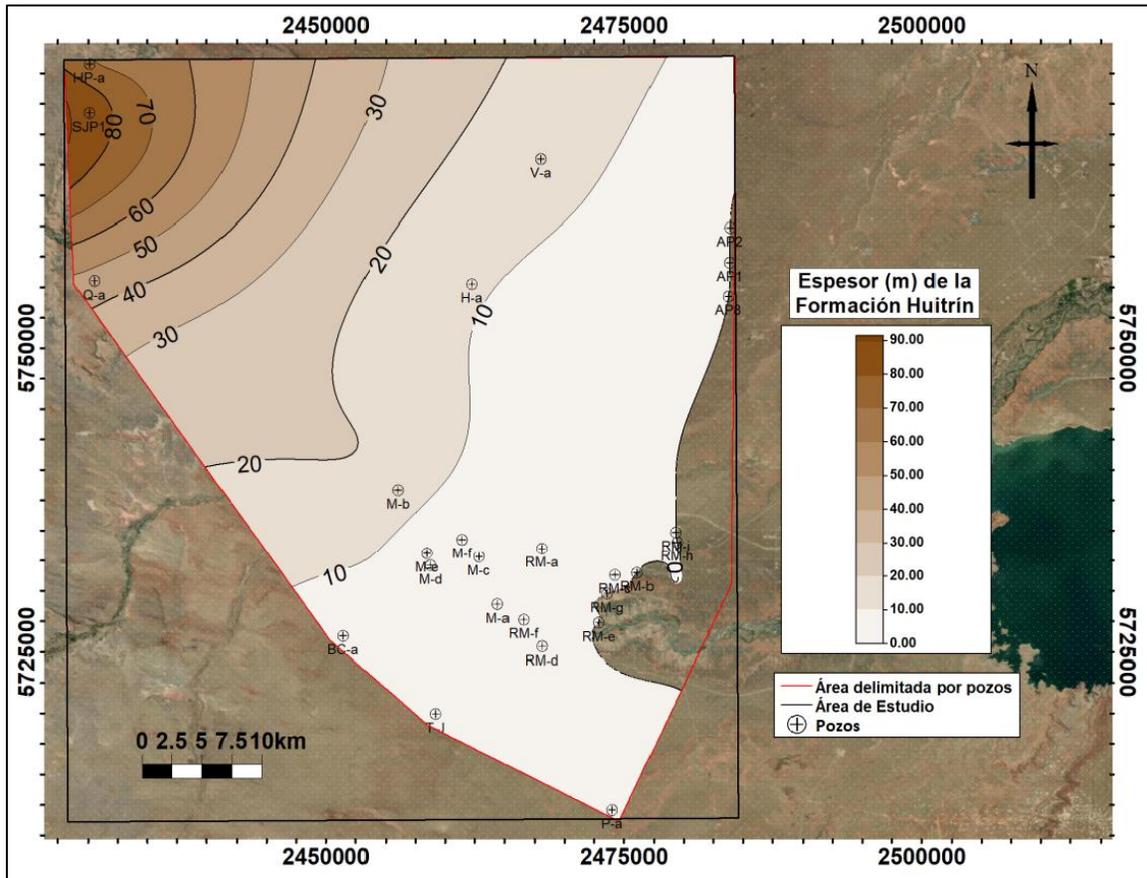


Figura 39: Mapa isopáquico de la Formación Huitrín. Se observa un mayor espesor en el área de la FPC del Agrio que disminuye bruscamente adentrándose en el DCh. Luego el adelgazamiento es gradual en dirección sureste hasta desaparecer en el borde oriental.

11.6.3 Formación Rayoso

La unidad alcanza una potencia máxima de 1100 m en la FPC al oeste del área de estudio. Desde ese punto pierde espesor en dirección sureste.

En ubicaciones próximas al pozo M-b, dentro de un área afectada por la erosión fluvial del río Neuquén, la Fm. Rayoso suele aflorar y alcanza un espesor mínimo registrado de 500 m. Sobre el área de Las Cárceles se puede observar que la formación aflora y presenta aproximadamente 600 m de espesor, debido a los efectos de erosión producidos por escorrentías superficiales de canales fluviales.

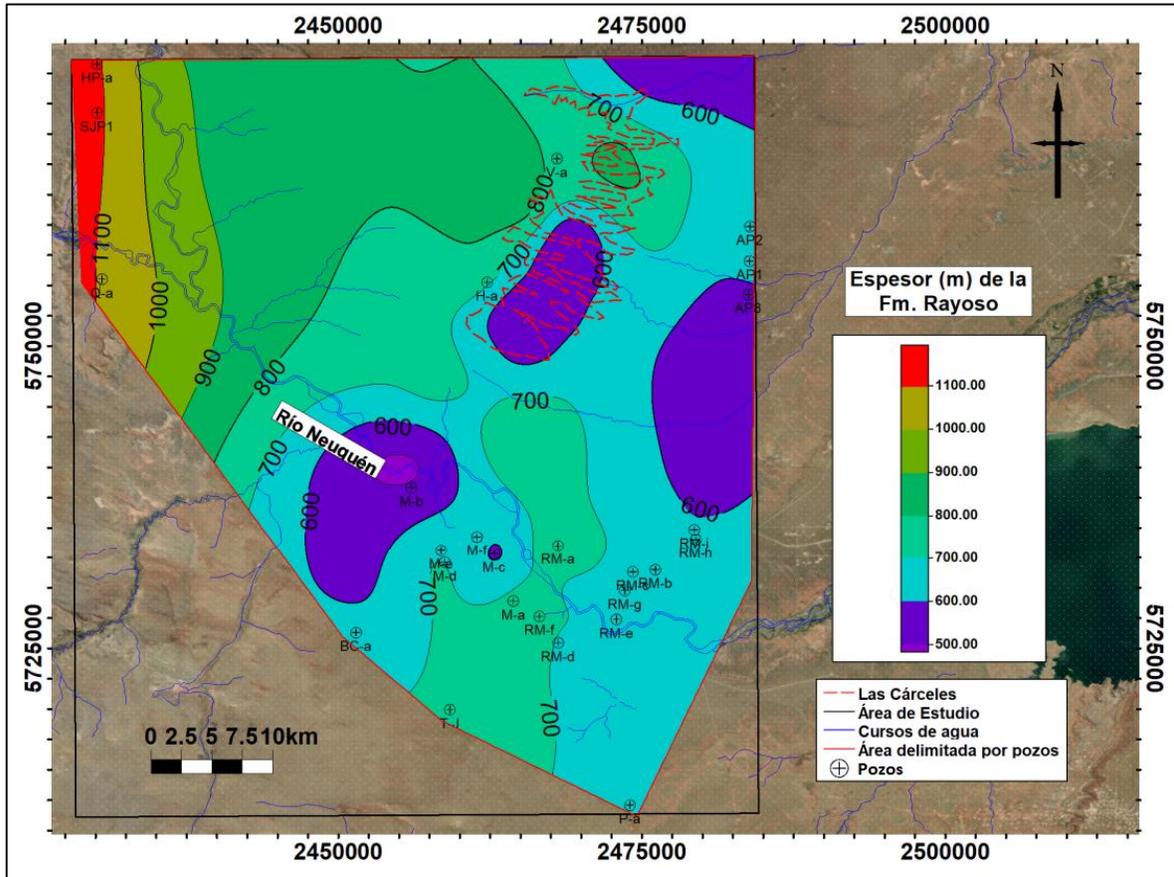


Figura 40: Mapa isopáquico de la Formación Rayoso dentro del área de estudio. La dirección general de adelgazamiento es hacia el Este, siendo esta más pronunciada en dirección SE.

11.6.4 Grupo Neuquén

Asociado a las formaciones Candeleros y Huincul, el espesor del Gr. Neuquén es de 250 m en la zona de la FPC al oeste del área de estudio. Sobre el DCh el espesor del grupo promedia 150 m, representado únicamente por la Fm. Candeleros la cual se encuentra aflorando. En el sector este del polígono, el Gr. Neuquén aumenta considerablemente su espesor hasta 400 m donde se involucra el Subgrupo Río Limay completo. Hacia el sur alcanza los 150 m de espesor con mayor participación de la Fm. Candeleros y en menor medida de la Fm. Huincul.

Se debe mencionar que la ausencia de sedimentos asociados al Gr. Neuquén en el área de Las Cárceles dentro del DCh, es naturalmente explicada por la escorrentía superficial de canales fluviales que erosionan la ladera oriental del Dorso hasta dejar expuestas sedimentitas de la Fm. Rayoso. Asimismo la erosión fluvial asociada al cauce principal del río Neuquén ha barrido con los sedimentos del Gr. Neuquén en el centro del área de estudio.

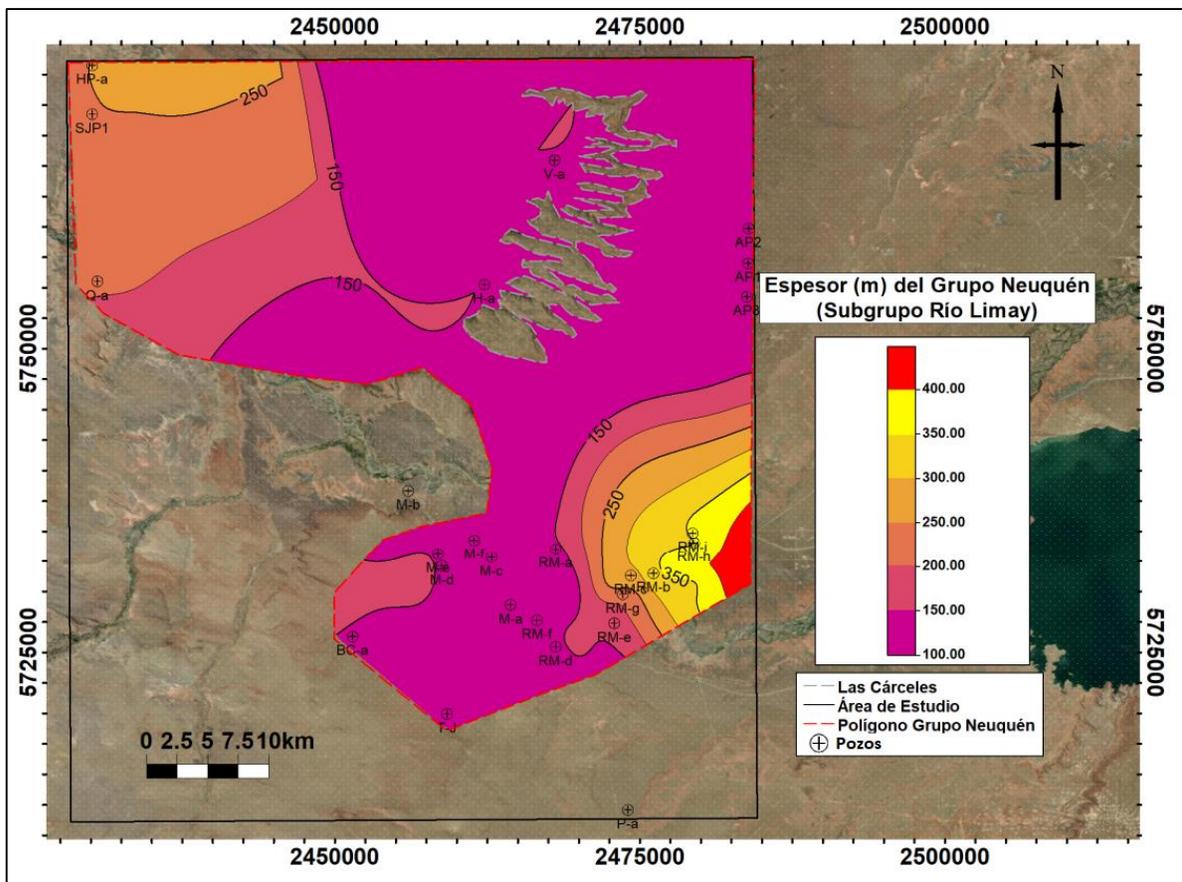


Figura 41: Mapa de espesores del Grupo Neuquén. Alcanza su máximo en el sector de sureste del polígono Gr. Neuquén. También se observa un aumento de espesor en el área de la FPC.

12 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

Según Sánchez San Román 2014 se considera unidad hidrogeológica al conjunto de unidades geológicas que contienen uno o varios acuíferos separados por acuicludos o acuitardos. Esta agrupación de unidades es subjetiva y depende de la escala y objetivos del trabajo.

12.1 Conceptos básicos

12.1.1 Hidrología de aguas subterráneas

La hidrología del agua subterránea es la subdivisión de la ciencia de la hidrología que se ocupa de la ocurrencia, movimiento y calidad del agua debajo de la superficie de la tierra (Heath 1993). La misma se centra en el estudio de aquellas formaciones geológicas que pueden proporcionar agua en cantidades suficientes para subvenir a las necesidades humanas (Custodio & Llamas 1976).

12.1.2 Clasificación de unidades geológicas según su comportamiento hidrogeológico

A continuación se describen brevemente la clasificación de las unidades geológicas según su comportamiento hidrogeológico, tomando como referencia el Tomo 1 de Hidrología subterránea publicado por Custodio y Llamas en 1976.

Acuífero: se denominan así a los estratos o unidades geológicas que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables. Como ejemplos de estos se pueden citar aluviones de los ríos formados por mezclas de gravas y arenas, areniscas poco cementadas, algunos tipos de rocas volcánicas, formaciones calcáreas muy karstificadas.

Acuicludo: del latín *claudere* (encerrar o cerrar) son las unidades geológicas que no pueden transmitir el agua contenida en su interior, incluso estando saturadas, motivo por el cual no son aptas hidrogeológicamente aptas para la captación de aguas subterráneas. Por lo general son estratos con porcentajes de arcillas superiores al 50%.

Acuitardo: Proveniente del latín *tardare*, retardar, se refiere a la existencia de numerosas unidades geológicas que teniendo volúmenes apreciables de agua, la transmiten muy lentamente imposibilitando el emplazamiento de captaciones subterráneas. Sin embargo pueden resultar importantes, debido a que pueden recargar o recibir agua unidades acuíferas que estén por encima o por debajo.

Acuífugo: son aquellas unidades geológicas que no contienen ni transmiten agua. Ejemplos de estas son los macizos graníticos no alterados o rocas metamórficas sin meteorización ni fracturas.

12.1.3 Clasificación de acuíferos según su comportamiento hidráulico

Acuíferos Libres: también conocidos como no confinados o freáticos, son aquellos en los que existe una superficie libre del agua, es decir que están en contacto con el aire a presión atmosférica (figura 42).

Acuíferos Confinados: también conocidos como cautivos o a presión, se encuentran cubiertos por un estrato impermeable. El agua contenida en estos ocupa la totalidad de los poros de la unidad geológica que la contiene, saturándola completamente. Su presión, generalmente es mayor a la atmosférica. Si se perfora penetrando la capa confinante, el agua subirá hasta alcanzar el nivel piezométrico, que si se ubica por encima del nivel del terreno actuara como pozo surgente sin necesidad de bombeo.

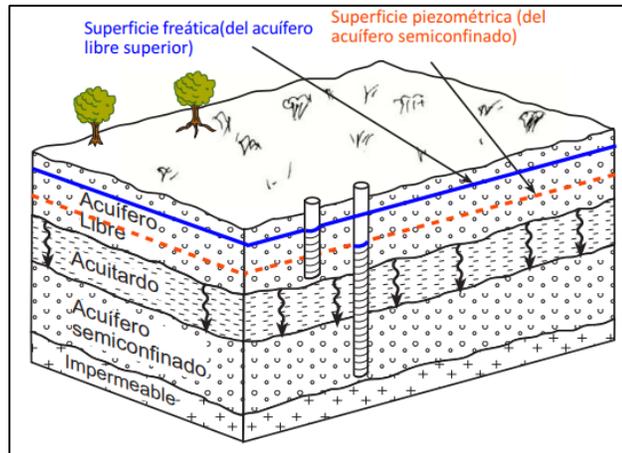


Figura 42: Esquema de acuíferos semiconfinados y libres (Extraído de Sánchez San Román (2014b)).

Acuíferos Semiconfinados: se consideran como un caso particular de acuífero confinado y ocurre cuando la parte inferior o el techo del que encierra el acuífero no son totalmente impermeable, sino que lo constituye un Acuitardo que transmite agua hacia el acuífero de forma lenta (figura 42).

13 PETROFISICA DE AGUAS SUBTERRANEAS

La petrofísica de aguas subterráneas para este trabajo incluye el análisis de la permeabilidad, porosidad, resistividad eléctrica y volumen de arcillas de las unidades geológicas que contienen aguas subterráneas. Esta información es fundamental para entender la calidad de los acuíferos lo que ayudaría a planificar y gestionar adecuadamente el uso de los recursos hídricos subterráneos.

13.1 Porosidad (\emptyset)

La porosidad (PHI o \emptyset) es la relación entre el espacio poroso de una roca y su volumen total (figura 43). La porosidad se expresa ya sea como una fracción decimal o como un porcentaje de tal manera que:

$$n = \frac{V_t - V_s}{V_t} = \frac{V_v}{V_t}$$

Donde n es la porosidad como fracción decimal, V_t es el volumen total de una muestra de roca, V_s es el volumen de sólidos en la muestra, y V_v es el volumen poroso (Heath 1993).

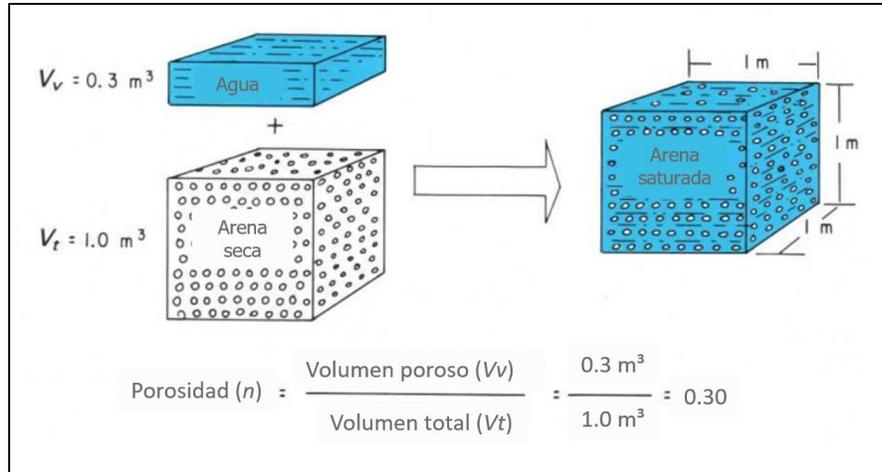


Figura 43: Ejemplo de cálculo porosidad en una porción arena saturada con agua. Modificado de Heath (1993).

13.1.1 Porosidad efectiva, rendimiento específico y retención específica.

Los conceptos de porosidad efectiva, rendimiento específico y retención específica nos permiten tener una comprensión más completa de la dinámica del agua subterránea. Esto es crucial para la gestión adecuada y sostenible de los recursos hídricos subterráneos, así como para la toma de decisiones informadas en proyectos de hidrogeología y en la protección de nuestros acuíferos.

A continuación se describen los conceptos mencionados y su relación a partir del libro “Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow” (Woesner y Poeter 2020).

La porosidad efectiva, el rendimiento específico y la retención específica representan cada uno una relación de un volumen de agua al volumen total de una roca con propiedades acuíferas.

La porosidad efectiva (n_e) se define como la proporción del volumen de espacios porosos interconectados (V_i) respecto al volumen total (V_t). Se puede expresar como fracción o porcentaje.

$$n_e = \frac{V_i}{V_t}$$

Tabla 4: Rangos de valores de porosidad total y porosidad efectiva de Enviro Wiki Contributors 2019. Tomado de Woesner y Poeter (2020).

Material	Porosidad Total	Porosidad Efectiva
Sedimentos No Consolidados		
Grava	0.25 – 0.44	0.13 – 0.44
Arena Gruesa	0.31 – 0.46	0.18 – 0.43
Arena Media		0.16 – 0.46
Arena Fina	0.25 – 0.53	0.01 – 0.46
Limo, loess	0.35 – 0.50	0.01 – 0.39
Arcilla	0.40 – 0.70	0.01 – 0.18
Rocas Sedimentarias y Cristalinas		
Caliza de Karst y arrecife	0.05 – 0.50	—
Caliza, dolomita	0.00 – 0.20	0.01 – 0.24
Arenisca	0.05 – 0.30	0.10 – 0.30
Lutitas	—	0.21 – 0.41
Basalto	0.05 – 0.50	—
Roca cristalina fracturada	0.00 – 0.10	—
Granito meteorizado	0.34 – 0.57	—
Roca cristalina no fracturada	0.00 – 0.05	—

El volumen de agua que se drena es menor que el volumen de agua en el espacio poroso interconectado debido a que parte del agua se adhiere a los sólidos debido a las fuerzas capilares. El término rendimiento específico S_y , se utiliza para describir la relación entre el agua que se drena por gravedad y el volumen total de una muestra de roca. El agua que permanece retenida en los espacios que no están interconectados, o por adhesión capilar a los granos minerales, la cual no puede ser drenada por gravedad o bombeo se la conoce como retención específica S_r .

La porosidad efectiva, el rendimiento específico y la retención específica representan cada uno una relación entre el volumen de agua y el volumen total de un material terrestre. Cuando se conocen dos de los parámetros, el tercero se puede calcular según la siguiente ecuación:

$$n_e = S_y - S_r$$

En materiales bien seleccionados y de mayor tamaño de grano la porosidad efectiva y el rendimiento específico tienden a poseer valores similares porque existe mayor cantidad de poros interconectados. En cambio en materiales con mala selección, las partículas más pequeñas se acomodan en los poros de tal manera que generan cortan las conexiones con los demás poros.

Tabla 5: Resumen de los valores de rendimiento específico de materiales terrestres comunes compilados por Morris y Johnson (1967) Modificado de Woesner y Poeter (2020).

Material	Rango de rendimiento específico (%)
Sedimentos no consolidados	
Arcilla	1 - 18
Limo	1 - 40
Loess	14 - 22
Arena eólica	32 - 47
Arena (fina)	1- 46
Arena (media)	16 - 46
Arena (gruesa)	18 - 43
Grava (fina)	13 - 40
Grava (media)	17 - 44
Grava (gruesa)	13 - 25
Sedimentos consolidados	
Esquisto	0.5 - 5
Siltita	1 - 33
Arenisca (grano fino)	2 -40
Arenisca (grano medio)	12 -41
Caliza y dolomita	0 - 36
Caliza kárstica	2 - 15

13.2 Saturación de agua (S_w)

Kirsch (2009) define a la saturación de agua (S_w) como la fracción de espacio poroso lleno de agua.

Esta se expresa típicamente como una fracción o porcentaje. Cuando los poros están completamente llenos de agua, se considera que la roca está saturada al 100% ($S_w=1$). Cuando los poros contienen otros fluidos además de agua se dice que la roca se encuentra parcialmente saturada de agua.

En este trabajo se consideró que el volumen poroso se encuentra completamente saturado con agua, es decir $S_w=1$.

13.3 Permeabilidad o conductividad hidráulica

Es uno de los factores que controla el movimiento del agua subterránea explicado por Henry Darcy en 1856 mediante la siguiente ley:

$$Q = KA \times \frac{dh}{dl}$$

Donde Q es el caudal de agua que atraviesa la sección transversal A , dh/dl es el gradiente hidráulico, y K es la conductividad hidráulica que depende del tamaño y disposición de las los poros y fracturas. Además depende de las características dinámicas del fluido como lo son la viscosidad y densidad.

Se reorganiza la ecuación de Darcy para obtener K en relación de distancia recorrida sobre unidad de tiempo (m/día):

$$K = \frac{Qdl}{Adh} = \frac{(m^3 \text{ día}^{-1})(m)}{(m^2)(m)} = \frac{m}{\text{día}}$$

Para estimar la calidad de los acuíferos analizados según su permeabilidad se utilizó la tabla 6, propuesta por Benítez (1963), que relaciona este parámetro con el tipo de litología que los componen.

Tabla 6: Tabla de clasificación de acuíferos según permeabilidad y litología, propuesta por Benítez (1963). Extraído de Custodio & 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 arcillas; arcillas estratificadas			Arcillas no meteorizadas			
Clasificación	Buenos acuíferos				Acuíferos pobres			Impermeables			
Capacidad de drenaje	Drenan bien				Drenan mal			No drenan			

13.4 Volumen de arcillas (Vol.arc)

13.4.1 Cálculo estimativo de volumen de arcillas

Una de las aplicaciones más utilizadas del registro de rayos gamma es la de estimar la arcillosidad (porcentaje de minerales arcillosos) de las unidades geológicas, factor que influye de manera directa en la caracterización hidrogeológica de una unidad sedimentaria. Para su determinación se utiliza la siguiente fórmula desarrollada por la operadora Schlumberger en 1974.

$$IGR = \frac{GR - GRmin}{GRmax - GRmin}$$

Donde:

- **IGR** = Índice de rayos gamma.
- **GR** = valor de rayos gamma del registro en el punto de interés.
- **GRmax** = Valor de rayos gamma que corresponde a arcillitas o lutitas.
- **GRmin** = Valor de rayos gamma correspondiente a formaciones limpias.

Para este trabajo se asumirá que el volumen de arcillas (Vol.arc) es igual al IGR teniendo en cuenta que esta relación puede exagerar dicho valor.

13.5 Resistividad

La resistividad es la medida de la resistencia que ofrece un material al flujo de la corriente eléctrica. Se representa con la letra griega ρ y su unidad es el Ohm.m.

13.5.1 Resistividad de la formación (R_t)

Este parámetro representa la resistencia del medio rocoso al flujo de la corriente eléctrica. Se puede obtener un valor aproximado del mismo a través del registro de inducción profunda (ILD/LLD) obtenido de la medición de la resistividad de la zona no invadida por el lodo de perforación.

13.5.2 Resistividad del agua de formación (R_w)

Representa la resistencia eléctrica del agua intersticial, la cual está controlada por el contenido de iones (salinidad) y la temperatura. Si los poros de una formación contienen agua salada presentará alta conductividad y por lo tanto la resistividad será baja, pero si están llenos de petróleo o gas presentará baja conductividad y por lo tanto la resistividad será alta.

13.5.2.1 Relación entre la resistividad de la formación y la resistividad del agua de formación (Archie 1942).

Debemos considerar R_t a la medición de la resistividad de la zona virgen (ILD/LLD). Entonces, partiendo de la base de que la resistividad eléctrica de la mayoría de los minerales es alta, a excepción de las arcillas, metales de mena y el grafito, la corriente eléctrica fluye casi exclusivamente a través del agua poral. Acorde a la ley de Archie, la resistividad de un medio rocoso saturado en agua y libre de arcillas se puede describir como:

$$R_t = R_w * F$$

Donde:

R_t : resistividad específica de la arena saturada en agua.

R_w : resistividad específica del agua poral.

F : Factor de formación. Combina todas las propiedades que influyen en el flujo de la corriente eléctrica como la porosidad, la forma de los poros y la cementación por diagénesis.

$$F = \frac{\alpha}{\phi^m}$$

α : Constante empírica.

m : Factor de cementación.

13.6 Cálculo de parámetros hidrogeológicos

Con el objetivo de identificar y delimitar las unidades hidrogeológicas acuíferas en la zona de estudio, se generaron curvas de volumen de arcillas, porosidad y salinidad sobre las que se establecieron valores límite o *cutoff* en cada una de ellas siguiendo los criterios expuestos a continuación.

13.6.1 Espesor

Se estableció que las unidades hidrogeológicas deben tener al menos 1 m de espesor, ya que espesores menores no serían ser observables en la escala del presente trabajo.

13.6.2 Volumen de arcillas (Vol.arc)

Custodio & Llamas (1983) determinaron que los buenos acuíferos están compuestos por arenas limpias y mezclas de grava con arenas, mientras que los estratos con intercalaciones y mezclas de arenas finas, limos y arcilla se clasifican como acuíferos pobres.

En base a lo mencionado, teniendo en cuenta el criterio seguido por Alonso (2016) en el flanco este del DCh, y considerando que las unidades litológicas analizadas para identificar niveles acuíferos están compuestas generalmente por intercalaciones de arcillitas, limolita y arenisca fina con matriz arcillosa, se estableció un límite de volumen de arcillas del 20%, teniendo en cuenta que la estimación de este parámetro arroja valores exagerados con respecto a los reales.

13.6.3 Porosidad calculada con perfil Sónico

El cálculo de la porosidad se realizó con la ecuación de Wyllie et al. (1958).

$$\emptyset = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}$$

Donde:

\emptyset = porosidad.

Δt : lectura del registro sónico.

Δt_f : tiempo de tránsito del fluido, se usa 189 $\mu s/ft$.

Δt_{ma} : tiempo de tránsito de la matriz, se usa 56.2 $\mu s/ft$.

Para generar la curva de porosidad se consideró un valor promedio de tiempo de tránsito de la matriz igual a 56.2 $\mu s/ft$, basado en el trabajo de Calderón Rincón *et al.* (2009).

La ecuación de Wyllie está diseñada para formaciones limpias y consolidadas. A raíz de esto las arenas no consolidadas o pobremente compactadas arrojan valores exagerados de porosidad como consecuencia de la disminución de la velocidad de la onda sónica a través del medio. Generalmente se considera que no existe suficiente compactación cuando el tiempo de tránsito de las lutitas adyacentes es mayor a 90 $\mu s/ft$. En este caso se aplica un factor de corrección empírico C_p cuyo valor varía entre 1 y 1.5. Entonces la ecuación de Wyllie modificada queda:

$$\emptyset = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} * \frac{1}{C_p}$$

Para este trabajo se consideran porosidades óptimas las que estén comprendidas entre los valores de 15 a 40%.

13.6.4 Salinidad

Para generar una curva de salinidad se consideró que las formaciones estuvieran saturadas 100% de agua, es decir $S_w=100\%$.

Para obtener R_w se despeja desde la ecuación de *Achie*:

$$R_w = R_t \times \phi^{m \times 1/a}$$

Con el valor de R_w , se procede a calcular la salinidad como se describe el método utilizado por la Comisión Nacional del Agua (2007).

$$\text{Salinidad} = 10^x$$

Donde:

$$x = \frac{[3,562 - \log(R_w - 0,0123)]}{0,955}$$

Entonces como el Decreto N° 2656/99 de la Provincia del Neuquén determina un límite de 3000 ppm de sales totales y/o 4000 $\mu\text{ohm/cm}$ de conductividad para considerar que un acuífero posee agua dulce, se consideró un valor límite de 3000 ppm de sales disueltas para delimitar los potenciales niveles acuíferos.

13.6.5 Estimación de valor límite de resistividad por el método de Archie (1942)

En los pozos donde no fue posible generar curvas de porosidad y salinidad por no contar con el registro sónico, se utilizó la fórmula de Archie (1942) con el objetivo de establecer un valor *cutttoff* en registros resistivos. Para esto fue necesario estimar R_w de manera aproximada considerando el gradiente geotérmico de la zona de estudio y la concentración de sales máxima permitida (3000 ppm).

Para el presente estudio se utilizaron los datos de leyes de variación de temperatura por regiones morfo estructurales de la Cuenca Neuquina (Mosquera y Ramos 2005) propuestos por Sigsmondi y Ramos (2008) (figura 44). El área de estudio abarca el flanco sur del Dorso de los Chihuidos y parte del Engolfamiento, por lo que se calculó el promedio entre las temperaturas de ambas regiones a una profundidad de 500 m, dando como resultado 23,5°C. Luego se ubicó este valor dentro de un ábaco de Schlumberger (figura 45), el cual relaciona temperatura del medio rocoso (°C), salinidad (concentración de NaCl eq. en ppm) y resistividad del agua de formación (ohm.m), con el objetivo de dar con un valor aproximado de esta última (figura 45).

Para un límite máximo establecido de 3000 ppm de sales totales disueltas, a una temperatura aproximada de 23.5°C se obtuvo un valor de **$R_w = 1.9 \text{ ohm.m}$** .

Con este dato, utilizando la fórmula de Archie:

Donde:

a: Constante de factor de tortuosidad.

m: Exponente de cementación.

n: Exponente de Saturación.

R_w: Resistividad del agua de formación.

R_t: Resistividad de zona virgen.

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{a \times R_w}{\phi^m \times R_t}}$$

Considerando $S_w=1$, la resistividad del agua de formación $R_w=1,9 \text{ Ohm.m}$, los factores $a=1$, $m=1.8$, $n=2$ según Archie (1942), y una porosidad promedio de 25% en los primeros 500 m de profundidad, el valor R_t que se obtiene despejado de la fórmula de Archie es de $R_t = 23.7 \text{ Ohm.m}$. El mismo fue utilizado como *cutoff* del perfil resistivo en los pozos que no poseen registro sísmico para generar curvas de salinidad.

Cuenca Neuquina: Leyes de variación de la temperatura por región							
Cuenca Neuquina	Faja plegada y corrida	Dorso de los Chihuidos	Plataforma nororiental	Engolfamiento	Dorsal de Huincul	Picún Leufú	Totales
	215	125	1688	471	421	21	2941
Profundidad (m)	0,0427z + 12,340	0,0522 z - 7,2733	0,0443 + 9,3205	0,0451 + 5,628	0,0438 + 13,295	0,0466 + 4,2425	0,0443 + 9,5967
0	12	-7	9	6	13	4	10
500	34	19	31	28	35	28	32
1000	55	45	54	51	57	51	54
1500	76	71	76	73	79	74	76
2000	98	97	98	96	101	97	98
2500	119	123	120	118	123	121	120
3000	140	149	142	141	145	144	142
3500	162	175	164	163	167	167	165
4000	183	202	187	186	188	191	187
4500	204	228	200	209	210	214	209
5000	226	254	231	231	132	237	231
5500	247	280	253	254	254	261	253
6000	269	306	275	276	276	284	275

Figura 444: Temperaturas a distintas profundidades dentro de las diversas regiones morfo estructurales de la Cuenca Neuquina. Para este trabajo se consideran los valores para la región del Dorso de los Chihuidos y Engolfamiento, ambos a 500 m de profundidad. Modificado de Sigsmondi y Ramos (2005).

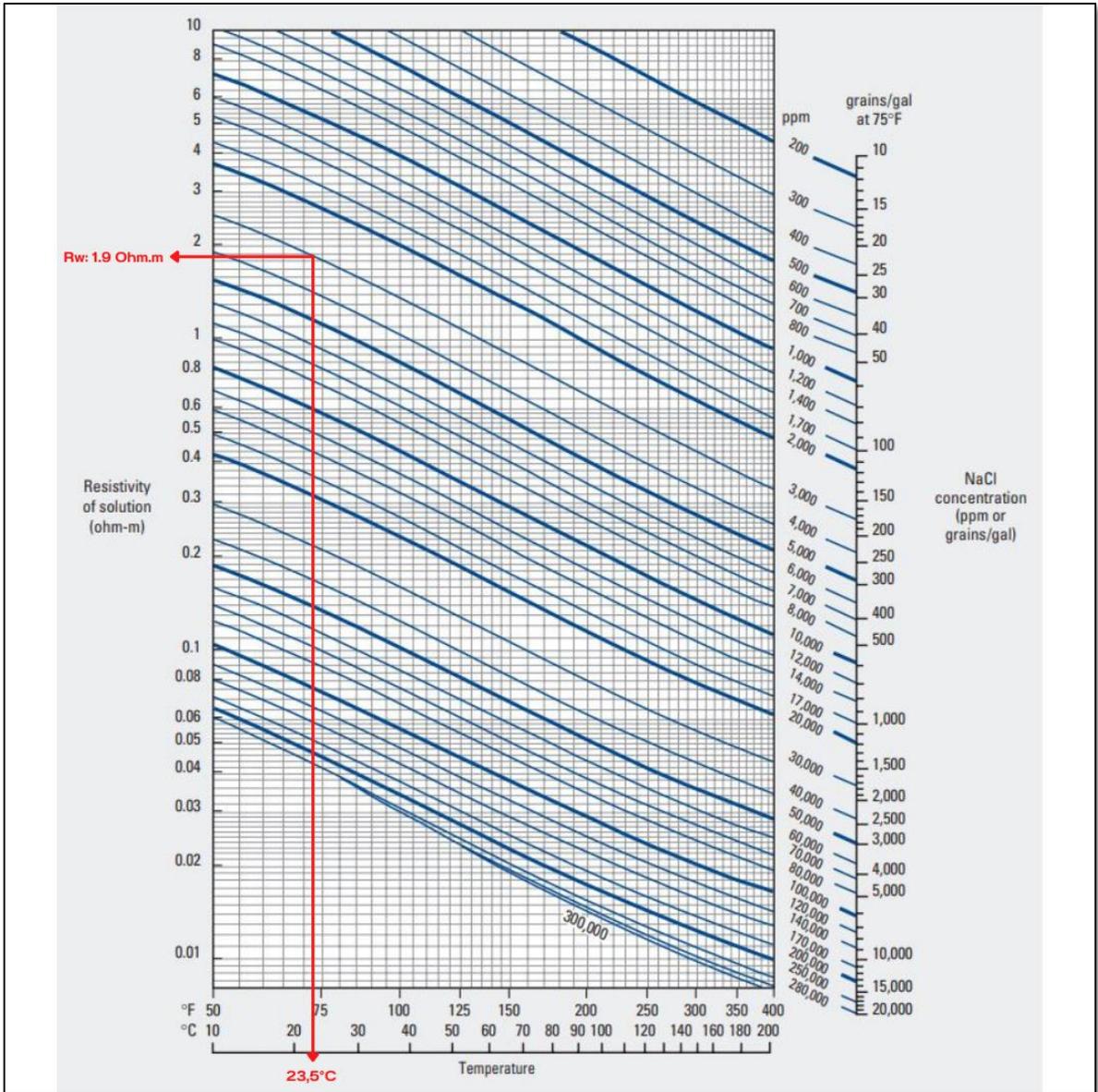


Figura 455: ábaco que relaciona la temperatura del medio rocoso (°C), concentración de NaCl en ppm y resistividad del agua de formación (ohm.m). Extraído de *Schlumberger Log Interpretation Charts* (2009).

14 CARACTERIZACION DE UNIDADES HIDROGEOLOGICAS EN EL AREA DE ESTUDIO

14.1 Criterios para la identificación de unidades hidrogeológicas acuíferas

Una vez instaurados los valores límites para los parámetros hidrogeológicos (tabla 7), se establecieron tres criterios para determinar capas acuíferas dentro de las unidades hidrogeológicas, considerando que gran parte de los pozos seleccionados no cuentan con el perfil sísmico para generar curvas de porosidad y salinidad. Estos criterios fueron calculados y aplicados con el comando calculadora del *software* Petrel 2017.4.

Tabla 7: Valores de corte para la identificación y caracterización de unidades hidrogeológicas acuíferas.

Curva	Valores
Porosidad por Wyllie (\emptyset)	15% $<\emptyset$ <40%
Volumen de arcillas (Vol.arc)	<%20
Salinidad	<3000 ppm NaCl eq.
Espesor de las capas	>1m
Resistividad por Archie	>23.7 Ohm.m

- **Criterio PSV (porosidad, salinidad, volumen de arcillas):** Como criterio principal se definió una pista que combina la condición de valores límites para los criterios de porosidad, volumen de arcillas y salinidad. Este criterio utiliza la mayor cantidad de información disponible, sin embargo, debido a que la mayoría de los pozos no cuentan con perfil sísmico para generar una pista de salinidad, no fue posible caracterizar unidades hidrogeológicas acuíferas únicamente bajo este criterio.
- **Criterio R-V (resistividad, volumen de arcillas):** Se definió una pista que combina la condición de valores límites para los criterios de resistividad por Archie y volumen de arcillas. Si bien este criterio es menos preciso que el PSV, la mayoría de los pozos cuentan con perfiles resistivos y de rayos gamma, siendo un buen complemento para poder mapear las características de las unidades hidrogeológicas acuíferas identificadas.
- **Criterio R (resistividad):** existen pozos que solo cuentan con registros de inducción en tramos cercanos a la superficie, por lo que se agregó una pista extra en la que se considera unidad hidrogeológica acuífera a aquellas secciones que tengan una resistividad mayor a 23.7 Ohm.m. Este es el criterio es el menos preciso y se usó para complementar los criterios anteriores.

14.2 Caracterización y cartografía des hidrogeológicas acuíferas

En esta sección se mapearon tope, base, profundidades, espesores y promedios de porosidad, salinidad, volumen de arcillas y resistividad de las unidades hidrogeológicas acuíferas interpretadas en la Fm. Rayoso y Gr. Neuquén. Para dicho objetivo se trazaron polígonos que encierran pozos con la información necesaria para realizar dichos mapas.

Finalmente se realizó una caracterización sobre el comportamiento de los parámetros calculados para dar una conclusión sobre la calidad de los posibles acuíferos identificados según su petrofísica.

Acorde a los límites de corte establecidos se pudieron detectar tres unidades hidrogeológicas acuíferas, dos de ellas dentro de la Fm. Rayoso y otra dentro del Gr. Neuquén.

Al acuífero más profundo dentro de la Fm. Rayoso se le asignó el nombre de **Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso** (UHAIR). Este se ubica por sobre la base arcillosa de la Fm. Rayoso, que funcionaría como acuicludo.

En los estratos superiores de la Fm Rayoso se interpretaron dos sectores de interés hidrogeológico que fueron analizados en conjunto como **Unidad Hidrogeológica Acuífera Superior de la Formación Rayoso** (UHASR), que se apoya sobre una capa arcillosa de entre 100 y 150 m de espesor, entre esta unidad y la UHAIR. Uno de los sectores de la UHASR se localiza en el área de la FPC y el otro al sur del DCh y norte de la Dorsal de Huincul. En ambos sectores el tope de la unidad es el contacto con la base de areniscas conglomerádicas de la Fm. Candeleros que funciona como capa impermeable a nivel regional.

Dentro del Gr. Neuquén se interpretó un sector de interés hidrogeológico ubicado al sureste del DCh al cual se le asignó el nombre de **Unidad Hidrogeológica Acuífera del Grupo Neuquén** (UHAN) cuyas reservas de agua subterránea se localizan entre la parte superior de la Fm. Candeleros y parte de la columna sedimentaria de la Fm. Huincul.

14.2.1 Unidad hidrogeológica acuífera inferior de la Formación Rayoso (UHAIR)

A través de la interpretación de registros de perforación y perfiles eléctricos se identificó a la UHAIR en 12 de los pozos disponibles (tabla 8) y luego se confeccionó el área de caracterización del acuífero con la información obtenida. Así mismo se tuvo en cuenta que no se detectaron condiciones óptimas en el sector de la FPC, y que se considera insuficiente la información disponible para caracterizar su comportamiento en todo el terreno que abarca el DCh.

Tabla 8: Pozos utilizados para la caracterización de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso.

POZO	PROFUNDIDAD (mbbp)		ESPESOR (m)	PROPIEDADES PETROFISICAS PROMEDIO			
	TOPE	BASE		Porosidad %	Vol. arc %	Salinidad (ppm eq NaCl)	Resistividad (Ohm.m)
AP1	381.60	506.1	124.5	22.10	30.06	11497.20	32.2
AP2	385	504	119	23.25	32.9	9276	34.49
AP8	374.85	499.79	124.94	23.40	34.04	9586.80	32.38
M-a	327.27	391.67	64.4	X	X	X	59.58
RM-a	332.95	457.54	124.59	X	48	X	32.25
RM-c	520.12	687.82	167.7	19.58	10.64	11838	52.16
RM-d	490.15	627.87	137.72	X	16.31	X	38.37
RM-e	461.86	587.15	125.29	16.86	31.15	11062.80	57.77
RM-f	334.06	471.48	137.42	X	5.69	X	42.33
RM-h	631.75	855.05	223.3	X	15.7	X	49.08
RM-i	639	853.47	214.47	18.39	1.15	13848	53.69
V-a	476	522	46	23.21	46.28	6513.60	58

Entonces el área considerada UHAIR abarca los flancos sur y este del DCh y llanura aluvial del río Neuquén.

Las capas acuíferas de esta unidad se componen principalmente por intercalaciones de areniscas finas y limosas haciendo que la calidad de acuífero de la unidad sea pobre en función de la permeabilidad. Dentro de la unidad también existen paquetes arcillosos y limo arcillosos que actúan como acuícludos y acuitardos.

14.2.1.1 Tope y base

La base se ubica 500 m.s.n.m en el pozo V-a y alcanza su punto más bajo al este a los -200 m.s.n.m. En cuanto al tope de la unidad, este encuentra su punto más alto sobre el DCh en el pozo V-a a los 579 m.s.n.m, y se profundiza hacia el sureste hasta los 0 m.s.n.m (figura 46).

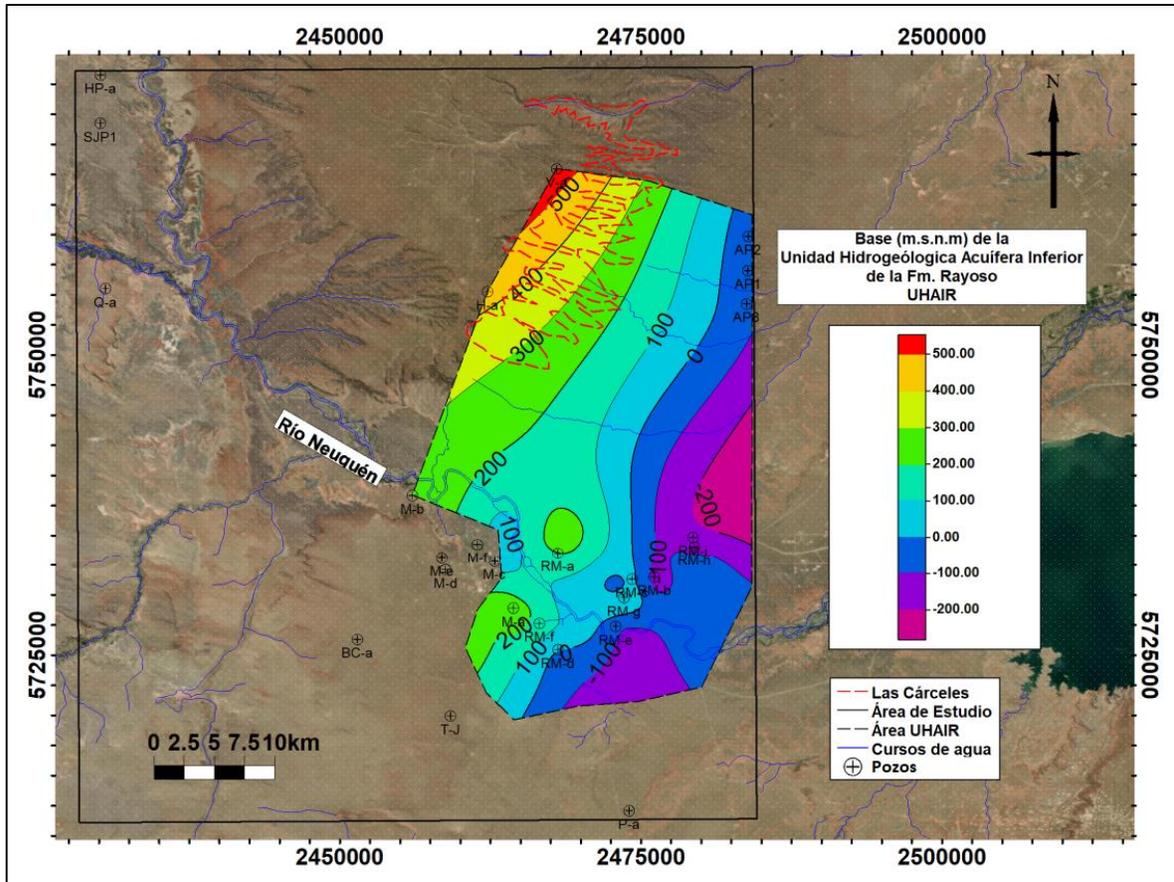


Figura 466: Base (m.s.n.m) de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso.

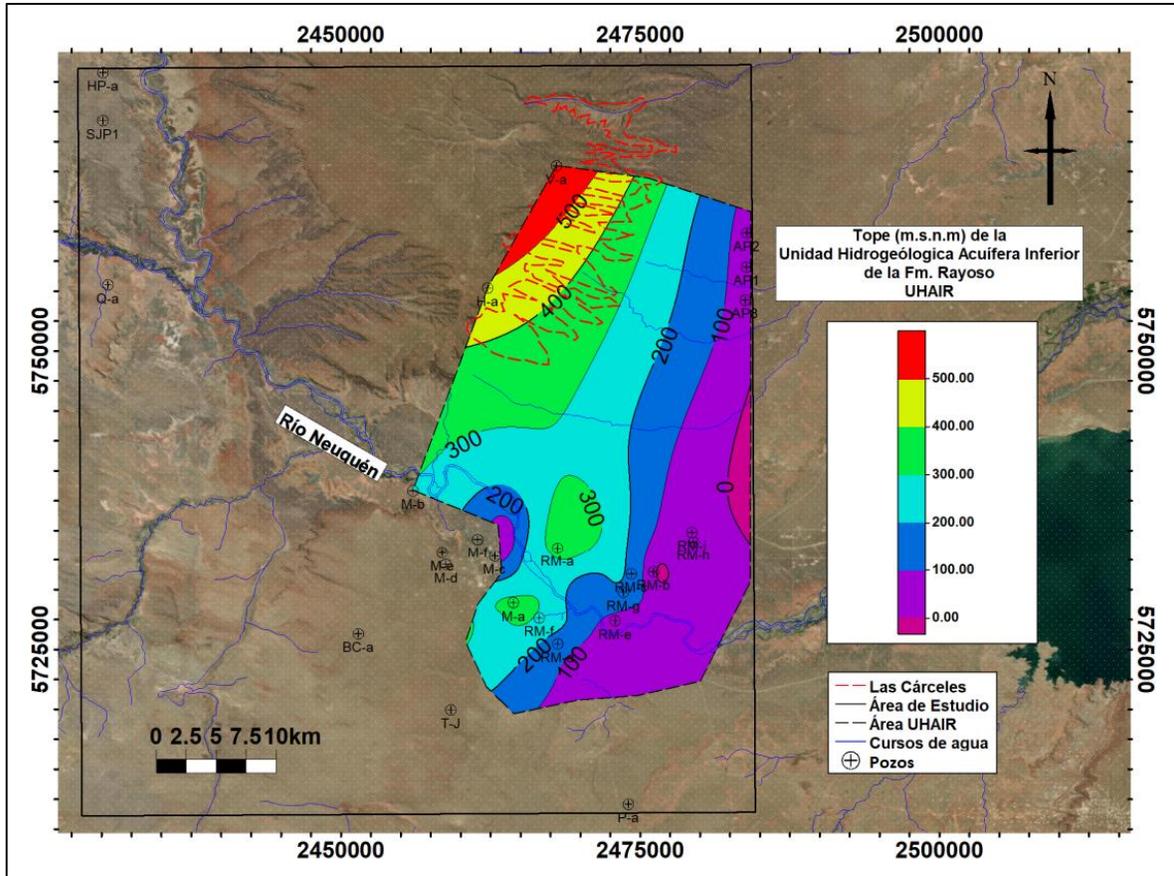


Figura 477: Tope (m.s.n.m) de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso.

14.2.1.2 *Espesor*

Sobre el DCh el espesor de la unidad promedio los 75 m, hasta presentara aproximadamente 200 m de espesor al este y 100 m al sureste del área de estudio.

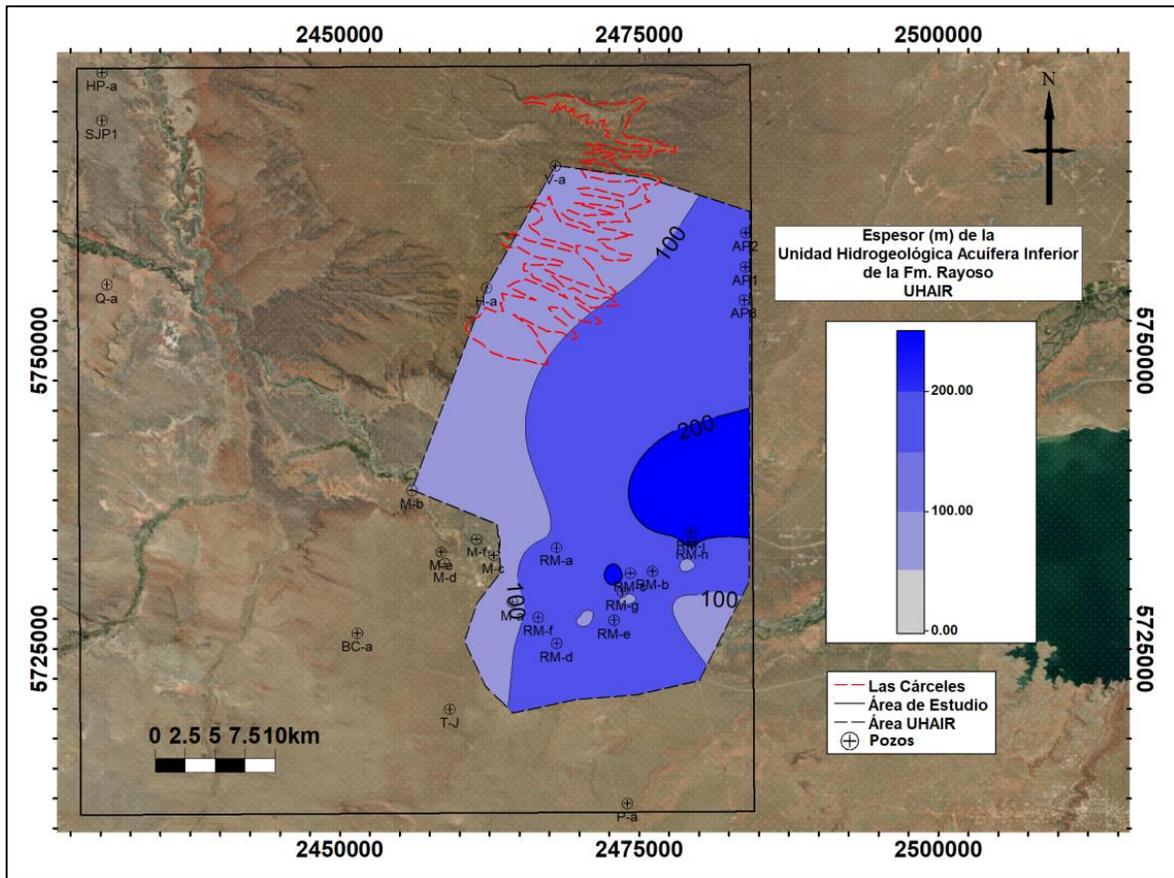


Figura 48: Espesor (m) de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso.

14.2.1.3 Profundidad

Se generó un mapa de profundidad desde el nivel del terreno hasta el tope de la unidad hidrogeológica. En la figura 49 se puede observar que la UHAIR se encuentra a profundidades de entre 400 y 500 metros en el DCh llegando a los 600 al este y sureste. En la zona de Las Cárceles y el área alrededor del pozo M-b donde el Grupo Neuquén no está presente, la unidad se localiza a 300 y 200 metros de profundidad.

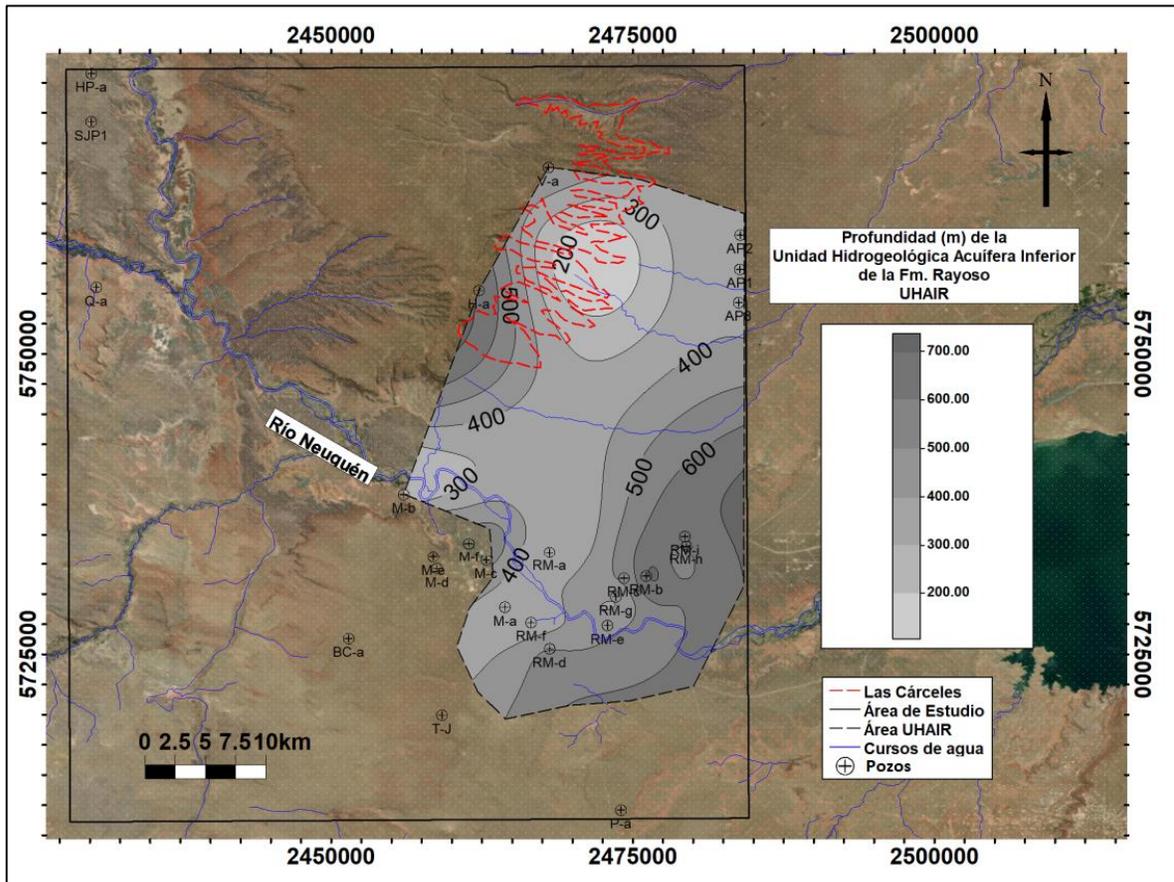


Figura 48: Profundidad (m) aproximada de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso.

14.2.1.4 Propiedades petrofísicas

En la figura 50 se observa la que porosidad promedio de la UHAIR disminuye de 26% a 19% de oeste a este. Por lo que, en líneas generales, las porosidades de la unidad son óptimas en toda el área delimitada.

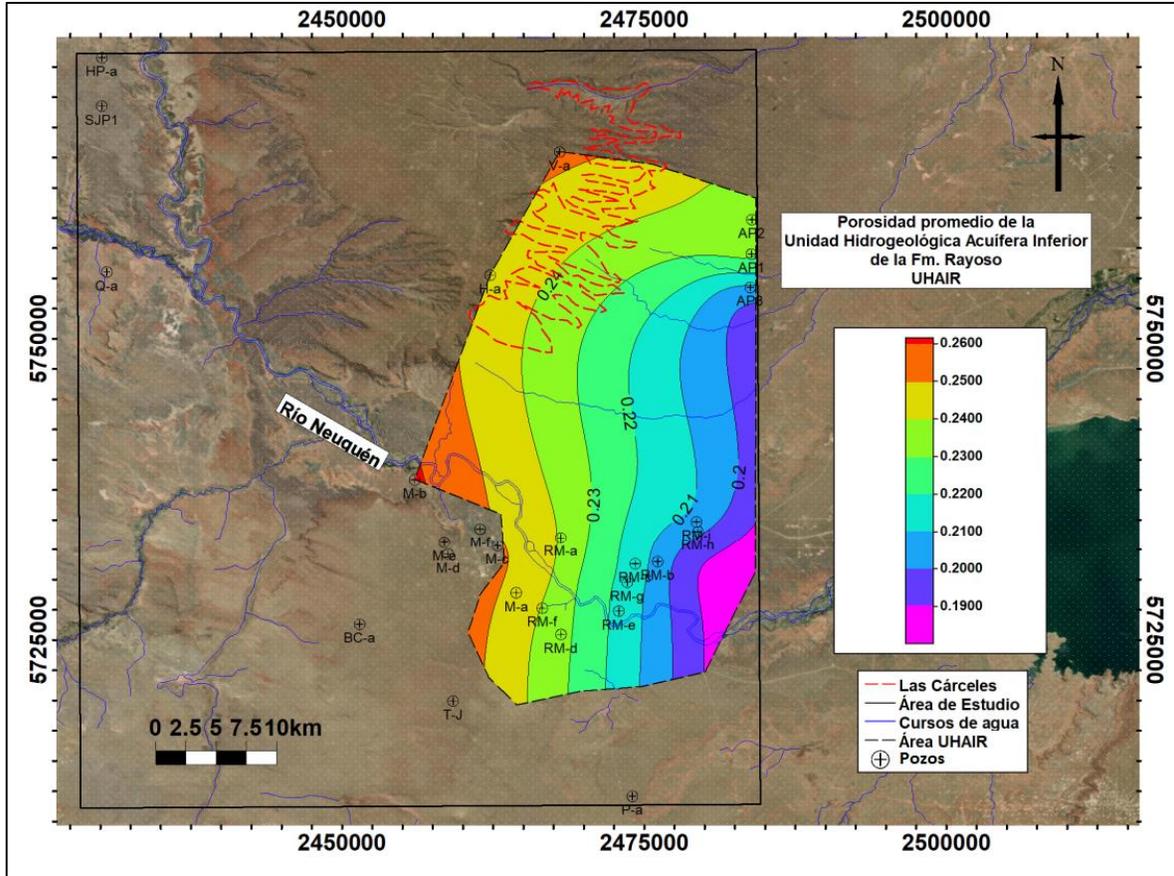


Figura 490: Porosidades promedio de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso.

El volumen de arcillas promedio aumenta en dirección oeste hasta un pico de 60% cerca del pozo M-a. Desde el flanco este del DCH hacia el sureste, el volumen arcilloso se reduce de 50 a 10% (figura 51).

Con esta información se pudo asumir que en cuanto arcillocidad, la UHAIR posee mejores aptitudes acuíferas al sureste.

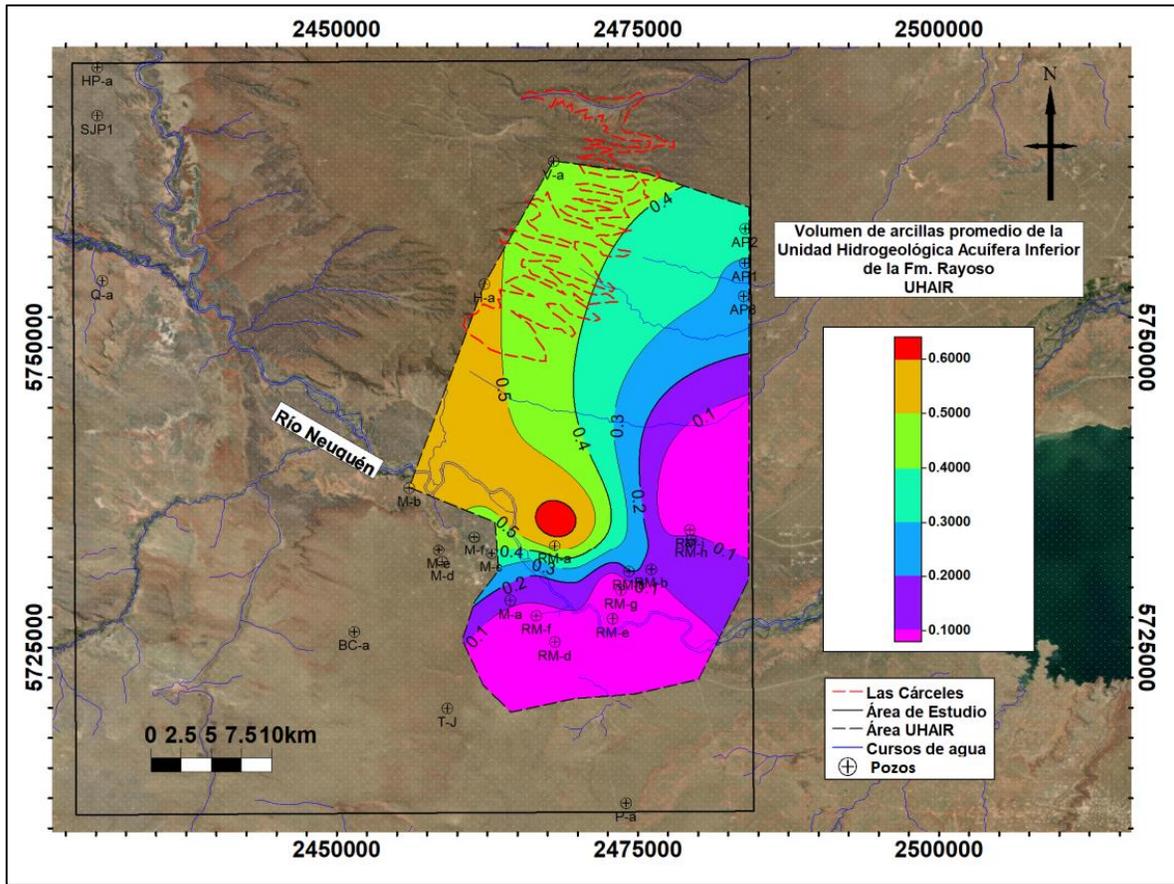


Figura 501: Volúmenes de arcillas promedio de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso.

Los valores de salinidad promedio en general se encuentran muy por encima del límite establecido. Desde el sector oeste varía desde 3000 ppm eq NaCl de manera gradual hasta su máximo en 12.000 ppm eq NaCl al sureste del UHAIR.

Teniendo en cuenta los espesores determinados en la unidad, la salinidad promedio tiende a aumentar en zonas donde la UHAIR posee mayor espesor.

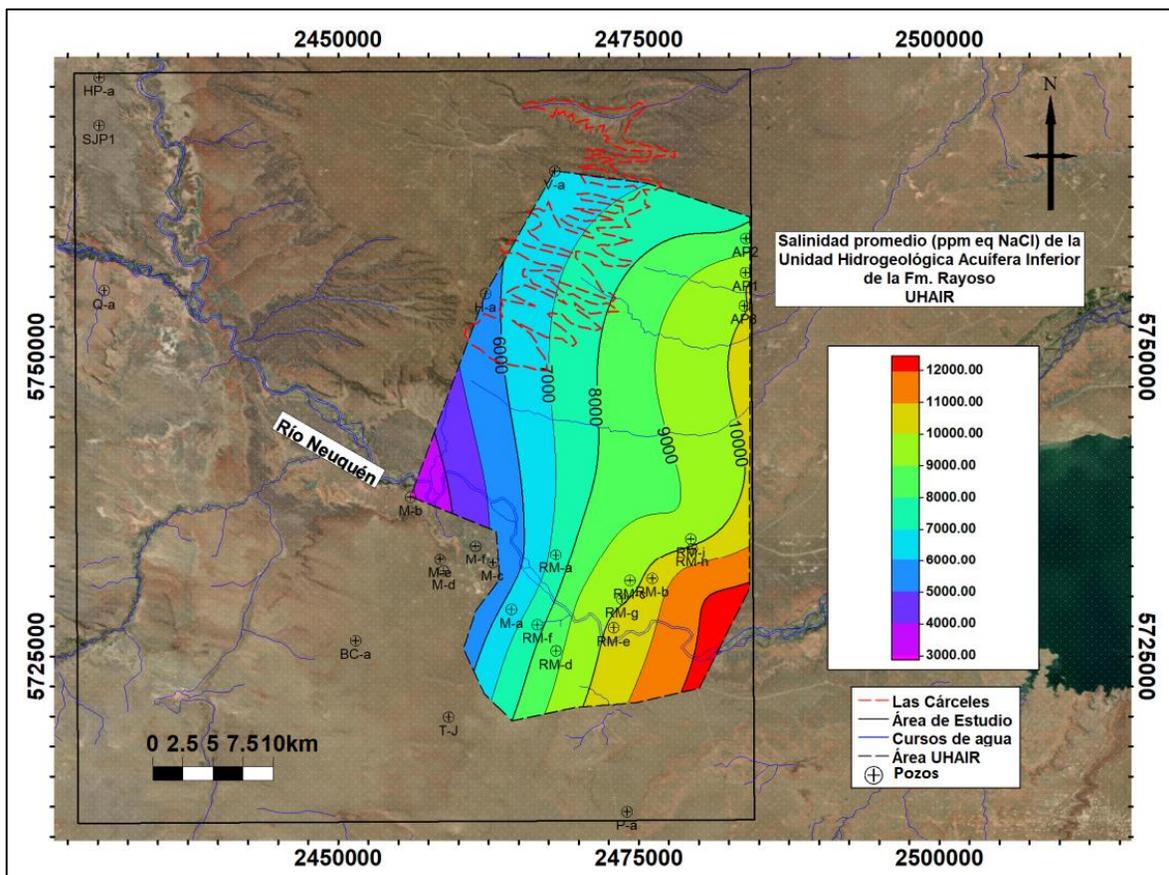


Figura 512: Salinidades promedio (ppm eq NaCl) de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso.

Las resistividades medias observadas en la figura 53 indican un descenso de la resistividad en dirección este y sureste que van desde los 70 a los 20 Ohm.m.

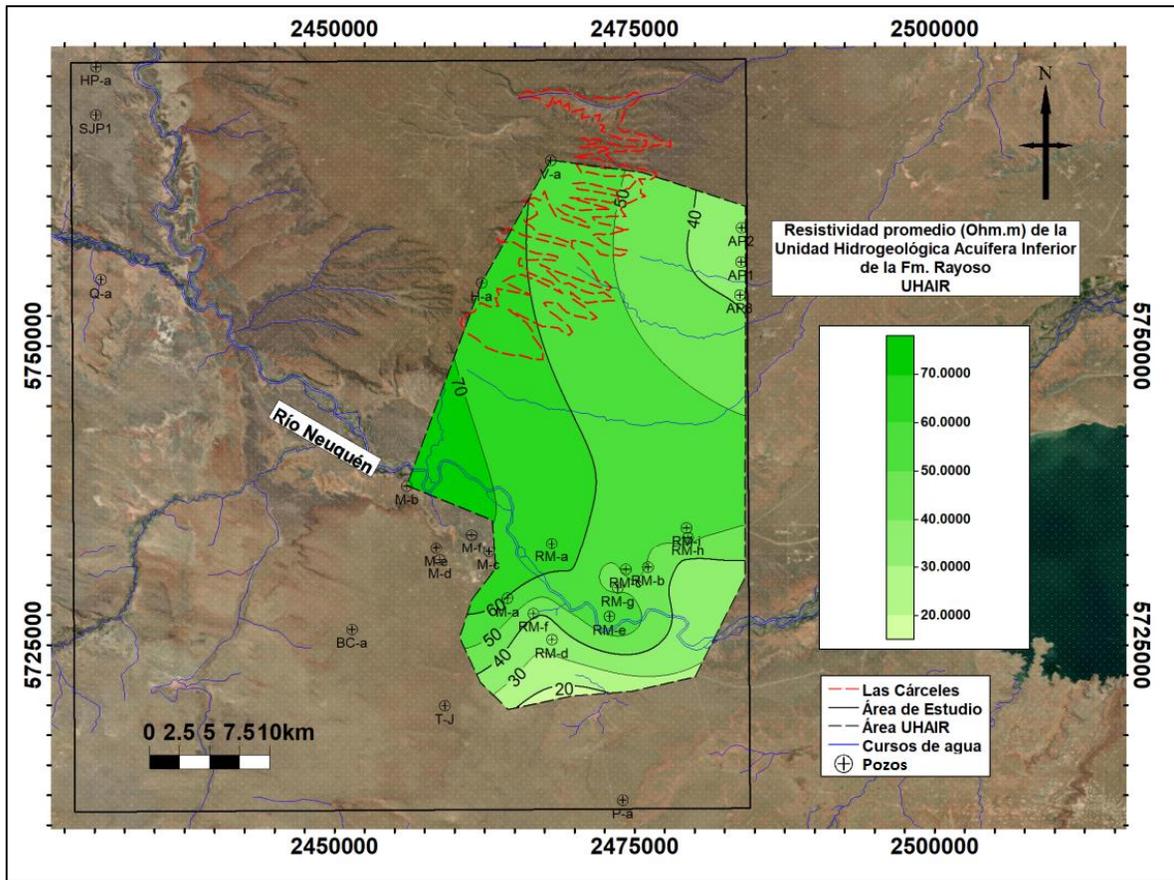


Figura 523: Resistividades promedio (Ohm.m) de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Inferior de la Formación Rayoso.

14.2.1.5 Síntesis Hidrogeológica

Considerando la información disponible con la que se confeccionaron los mapas descritos, se observó que la mayor parte del área que engloba la unidad posee valores de salinidad y contenido arcilloso promedio muy por encima del límite establecido. En conclusión la unidad hidrogeológica es salina.

14.2.2 Unidad Hidrogeológica Acuífera Superior de la Formación Rayoso (UHASR)

Esta unidad fue mapeada y caracterizada a partir de su identificación en 17 de los pozos disponibles según los parámetros de corte establecidos (tabla 9).

Tabla 9: Profundidades en mbbp del tope y base de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Superior de la Formación Rayoso junto con sus espesores y características petrofísicas promedio calculadas en cada pozo. Los valores resaltados se consideran anomalías tenidas en cuenta en la generación de mapas.

POZO	PROFUNDIDAD (mbbp)		ESPESOR (m)	PROPIEDADES PETROFÍSICAS PROMEDIO			
	TOPE	BASE		Porosidad %	Vol.arc %	Salinidad ppm eq NaCl	Resistividad (Ohm.m)
HP-a	453	470	17	18.69	21	23563.3	18.09
M-c	233.62	311.67	78.05	X	11.12	X	39.6
M-d	261.55	360.23	98.68	28.62	40.73	5423	46.16
M-e	353.63	474.7	121.07	47.49	34.45	2161.23	670.94
M-f	251.44	338.03	86.59	25.60	44.39	2788	62.2
RM-a	162.02	186.62	24.6	X	40.85	X	57.13
RM-b	377.64	432.61	54.97	X	12.59	X	75.58
RM-c	337.49	410.2	72.71	25.79	14.85	2383.31	98.32
RM-d	290.37	330.87	40.5	X	14.57	X	61.69
RM-e	188.91	253.82	64.91	X	27.39	X	59.79
RM-f	164.47	191.89	27.42	X	4.68	X	31.43
RM-g	238.72	288.68	49.96	X	36.26	X	88.91
RM-h	424.85	484.72	59.87	X	12.76	X	73.19
RM-i	449.21	518.28	69.07	24.49	2.07	2294.81	86.37
SJP1	356.54	408.59	52.05	20.64	44.4	6986.97	30.69
T-J	160.56	183.29	22.73	31.19	52.68	3442.48	34.26

Se optó por describir a la unidad en dos sectores diferenciados debido a la ausencia de información entre los pozos ubicados en la FPC al oeste y aquellos al sureste del área de estudio, donde también existe mayor densidad de información.

Al noroeste, en la FPC, la unidad se compone por niveles de limoarcilitas arenosas que indican una baja permeabilidad, convirtiéndolo así en un acuífero pobre.

Al sur del DCh y norte de la Dorsal, la unidad está compuesta principalmente de areniscas finas a medianas, cuarzosas y subangulares, en algunos casos con matriz arcillosa. Esto permitió inferir que la calidad de acuífero de la unidad en este sector entraría en el rango de acuíferos pobres cercano al límite con buenos acuíferos, según su litología y permeabilidad.

14.2.2.1 Tope y base

En la figura 55 se observa que la base de la unidad en el sector de la FPC alcanza los 500 m.s.n.m buzando hacia el noroeste hasta alcanzar los 300 m.s.n.m. Al sur del DCh la base de la unidad se ubica a 500 m.s.n.m. Desde allí se profundiza hasta los 200 m.s.n.m al sureste del área de estudio. El tope de la UHASR se ubica generalmente a entre 100 y 50 m por encima de la base siguiendo las mismas direcciones de profundización (figura 54).

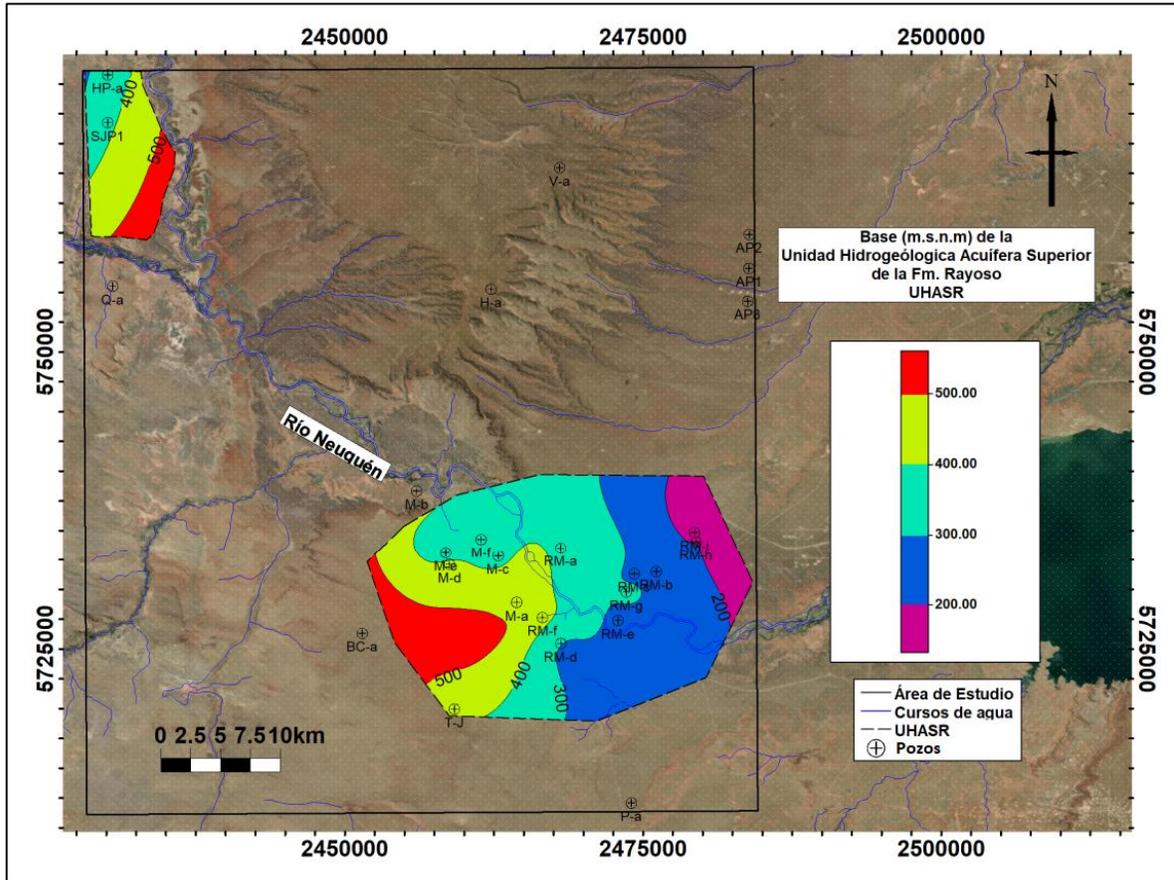


Figura 534: Base (m.s.n.m) de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Superior de la Formación Rayoso.

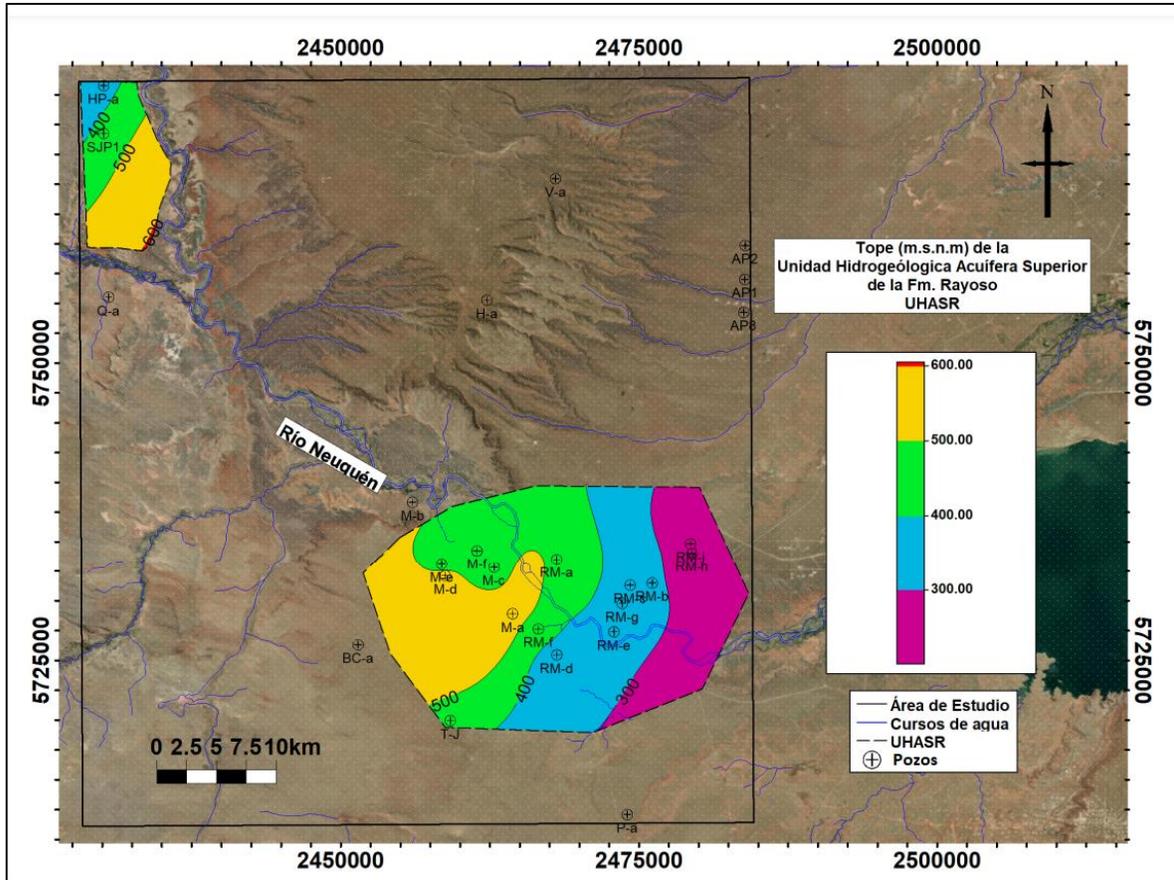


Figura 545: Tope (m.s.n.m) de la Unidad Hidrológica Superior de la Formación Rayoso.

14.2.2.2 Espesor

En la figura 56 se observa que el espesor de la unidad varía entre los 50 y los 100 m en gran parte del área de trabajo. La mayor concentración de agua subterránea se localiza en el centro del área de la UHASR donde se observa un espesor máximo de 100 m. En la región de la FPC la unidad disminuye su espesor en dirección norte.

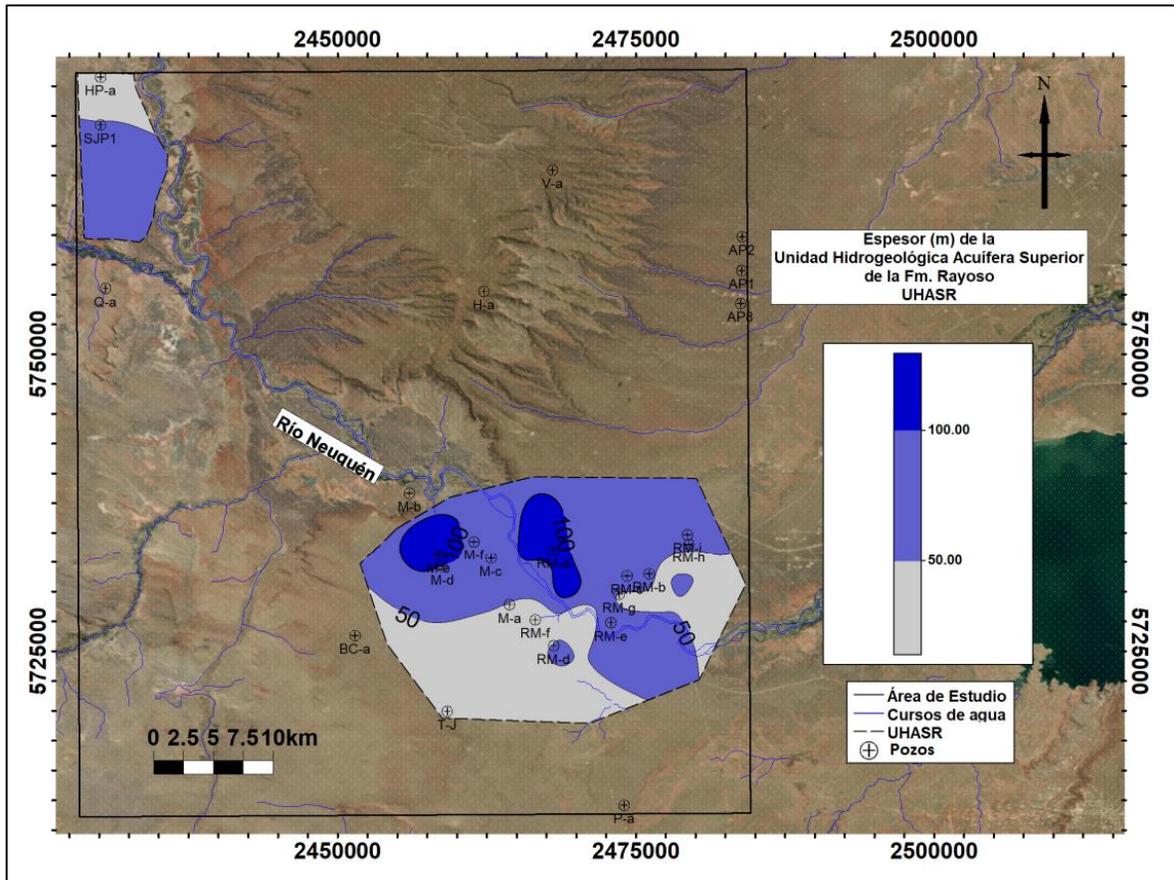


Figura 556: Espesor (m) de la Unidad hidrogeológica Superior de la Formación Rayoso.

14.2.2.3 Profundidad

En el sector de la FPC el acuífero se encuentra a mayor profundidad en dirección norte alcanzando los 400 m aproximados desde la superficie. En las cercanías del río Agrio puede encontrarse a 100 m de profundidad.

En el margen izquierdo del río Neuquén, al sureste del área de estudio, la unidad acuífera alcanza la profundidad máxima de 400 m en dirección este.

Al sur del río Neuquén, la UHASR se localiza entre los 200 y 100 metros de profundidad. Sin embargo en el pozo M-e se encuentra a 300 m desde la superficie.

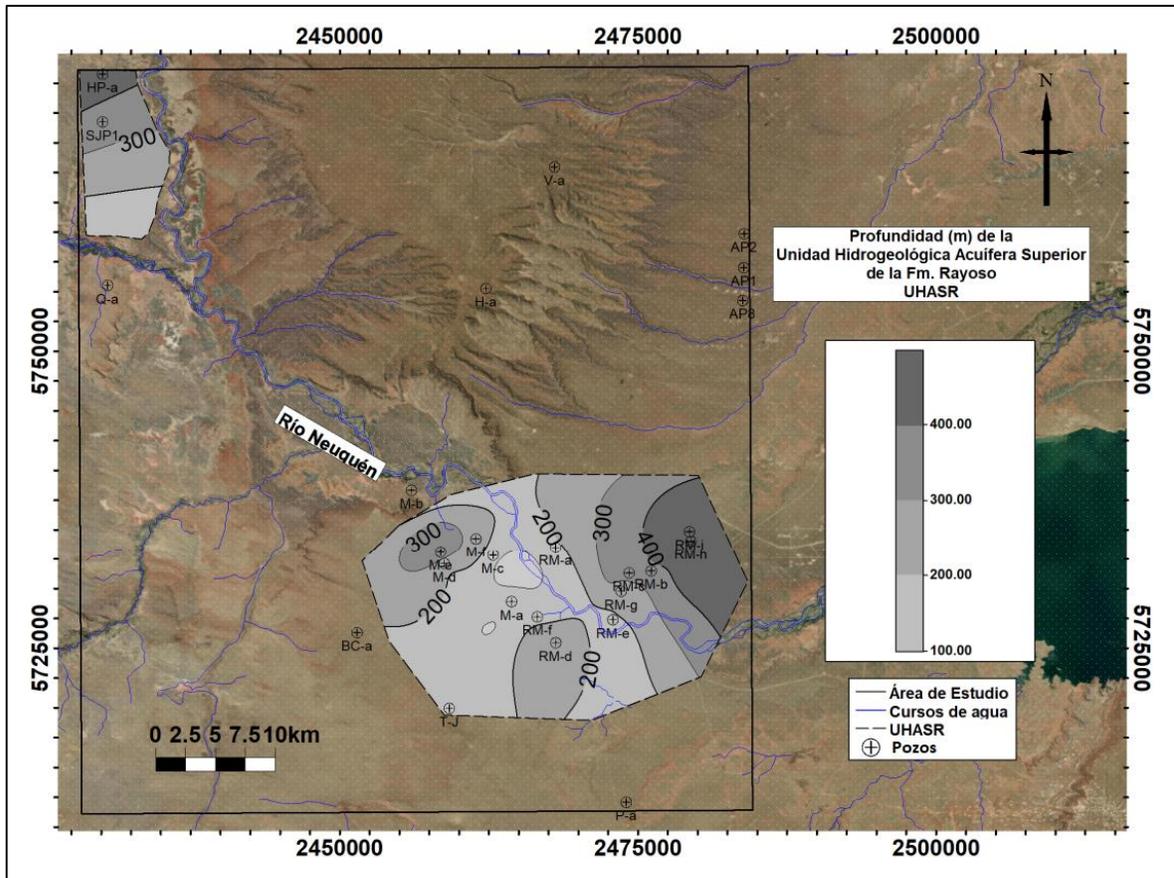


Figura 56: Profundidad (m) aproximada de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Superior de la Formación Rayoso.

14.2.2.4 Propiedades Petrofísicas

La porosidad promedio de la UHASR en la FPC al noroeste del área de estudio, es de aproximadamente 20% con un pequeño incremento en dirección al río Neuquén.

Al sur del DCh la porosidad promedio va de 25% en el borde este de la UHASR hasta 35% al sureste de la misma, en el pozo T-J.

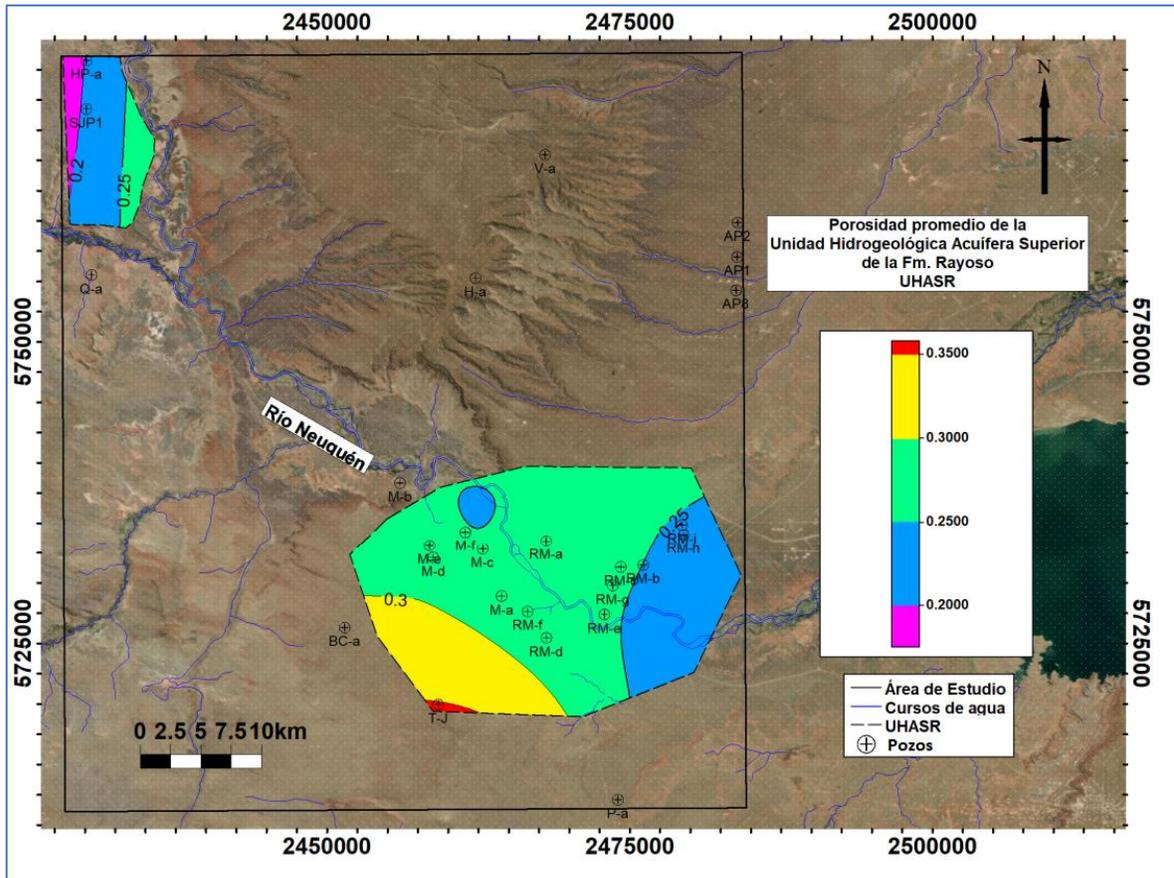


Figura 578: Porosidades promedio de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Superior de la Formación Rayoso.

En la figura 59, el volumen de arcillas promedio estimado sobre la FPC va de 40% a 50%, lo que se traduce en baja permeabilidad y movimiento de aguas subterráneas. Al sur del DCh el volumen de arcillas promedio aumenta de este a oeste pasando de 10% a 50%.

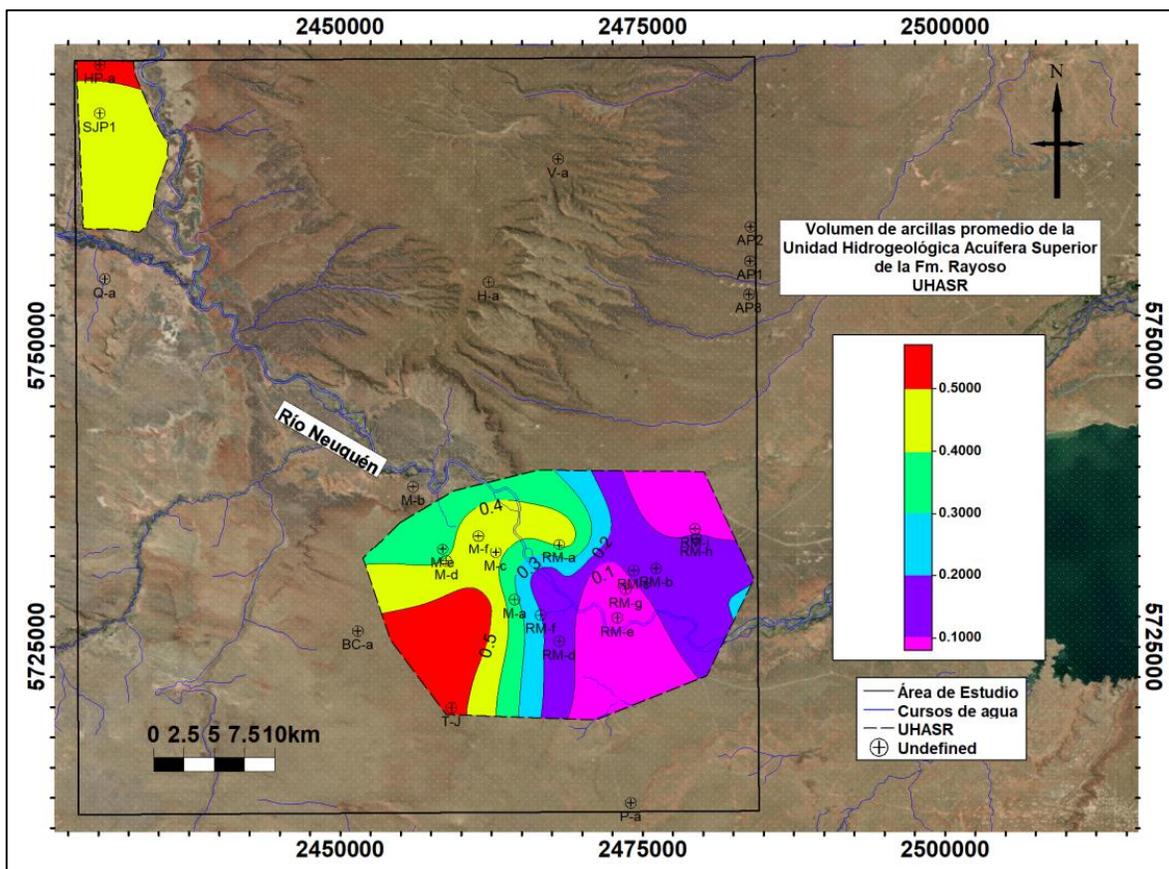


Figura 58: Volúmenes de arcillas promedio de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Superior de la Formación Rayoso.

La salinidad promedio observada en la figura 60 indica que en la región de la FPC, el contenido de sales disueltas varía entre los 7000 a los 6000 ppm eq NaCl en dirección este. Estos valores se encuentran muy por encima de límite establecido como para considerar acuífero a la unidad en este terreno.

Al sur del DCh, la salinidad disminuye en dirección este desde el centro sur de la UHASR. Pasa de 5000 ppm eq NaCl a 3000 ppm eq NaCl.

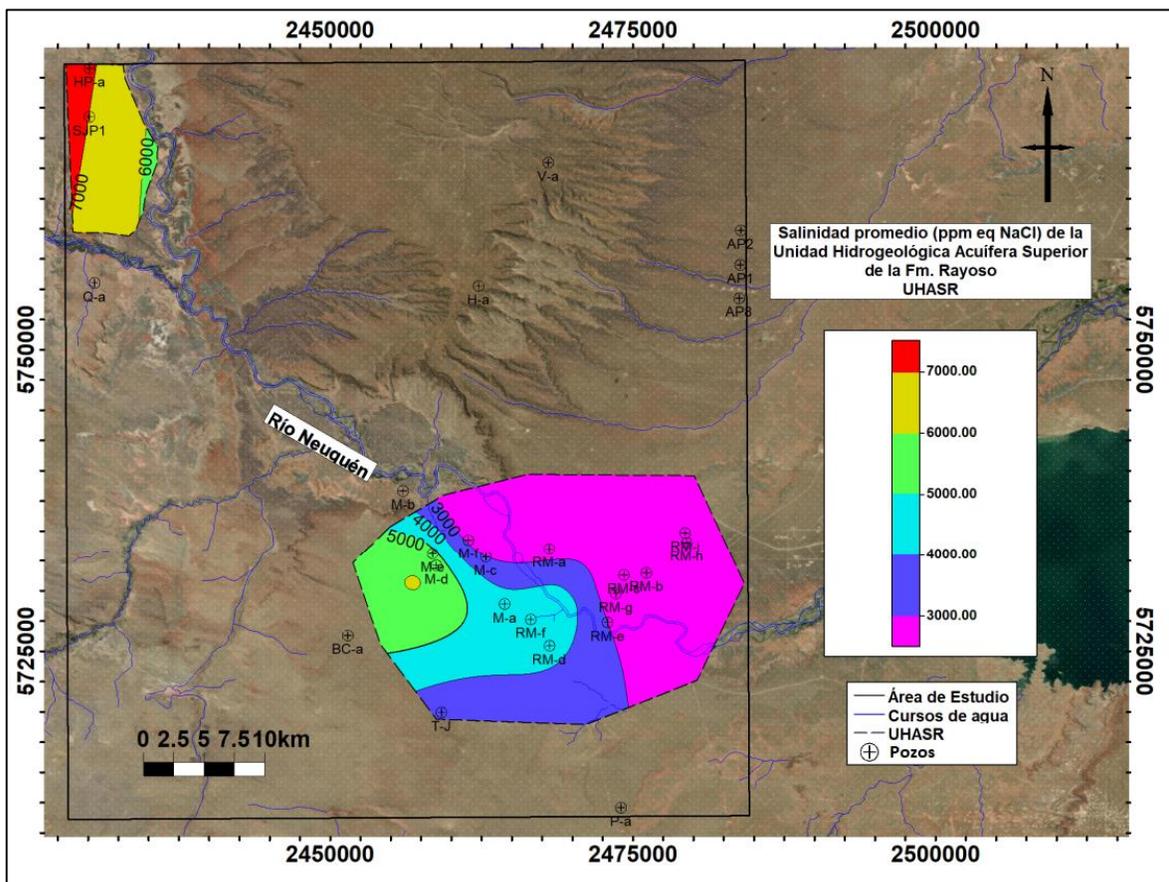


Figura 590: Salinidades promedio (ppm eq NaCl) de la Unidad Hidrogeológica Acuífera Superior de la Formación Rayoso.

14.2.3 Unidad Hidrogeológica del Grupo Neuquén (UHAN)

La unidad acuífera fue reconocida e interpretada en 8 de los pozos disponibles al sureste del área de estudio donde existía mayor densidad de pozos e información desde superficie de los registros siendo que en el área delimitada, el Gr. Neuquén aflora o se encuentra cubierto por depósitos cuaternarios.

Tabla 10: Profundidades en mbbp del tope y base de la Unidad Hidrogeológica Acuífera del Grupo Neuquén junto con sus espesores y características petrofísicas promedio calculadas en cada pozo.

POZO	PROFUNDIDAD (mbbp)		ESPESOR (m)	PROPIEDADES PETROFÍSICAS PROMEDIO			
	TOPE	BASE		Porosidad %	Vol. arc %	Salinidad ppm eq NaCl	Resistividad (Ohm.m)
RM-a	20.48	45.63	25.15	X	18.92	X	34.55
RM-b	125.5	266.9	141.4	X	12.5	X	34
RM-c	95.8	234.5	138.7	30.1	10.78	3177	41.55
RM-d	91.76	198.33	106.57	X	7.8	X	44.3
RM-e	32.76	120.28	87.52	X	14.19	X	115.3
RM-g	46.14	143.6	97.46	X	21.9	X	59.94
RM-h	152.5	303	150.2	X	11.2	X	40.37
RM-i	161.6	322.59	160.99	31.94	2.85	3674	39.06
T-J	26.45	49.07	22.62	28.4	27.13	3496	46.62

Los niveles acuíferos de esta unidad se encuentran principalmente entre en la Fm. Huincul y parte superior de la Fm. Candeleros.

Según controles geológicos en el área de la UHAN, los niveles acuíferos están compuestos principalmente por areniscas finas a medias y gruesas con baja matriz arcillosa y poco consolidada. Generalmente estos niveles se intercalan con limoarcilitas castaño rojizas que aumentan su espesor hacia la parte superior de la unidad donde marcan el tope del acuífero. En base a esto, según la permeabilidad por composición litológica, se clasifica a la unidad como buen acuífero siendo que se compone mayormente por areniscas de diverso tamaño de grano poco consolidadas y con poca matriz arcillosa.

14.2.3.1 Tope y base

El tope y la base de la unidad se caracterizan profundizarse en dirección este. El tope tiene su punto más alto a 650 m.s.n.m en las cercanías del pozo RM-a y desciende hasta alcanzar los 500 m.s.n.m al este de la UHAN. Allí la base de la unidad se encuentra a 200 m.s.n.m haciendo que ese sector sea el de mayor espesor y profundidad.

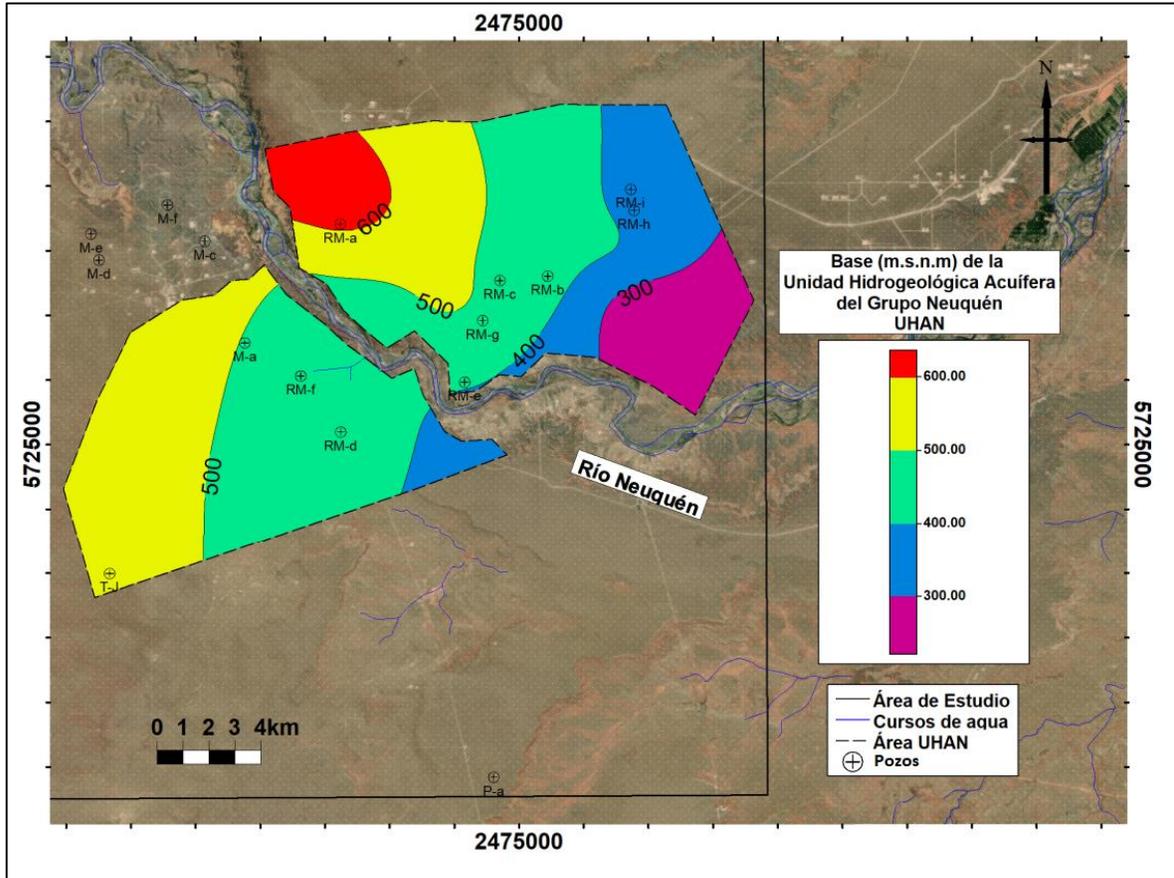


Figura 612: Base (m.s.n.m) de la Unidad Hidrogeológica Acuífera del Grupo Neuquén.

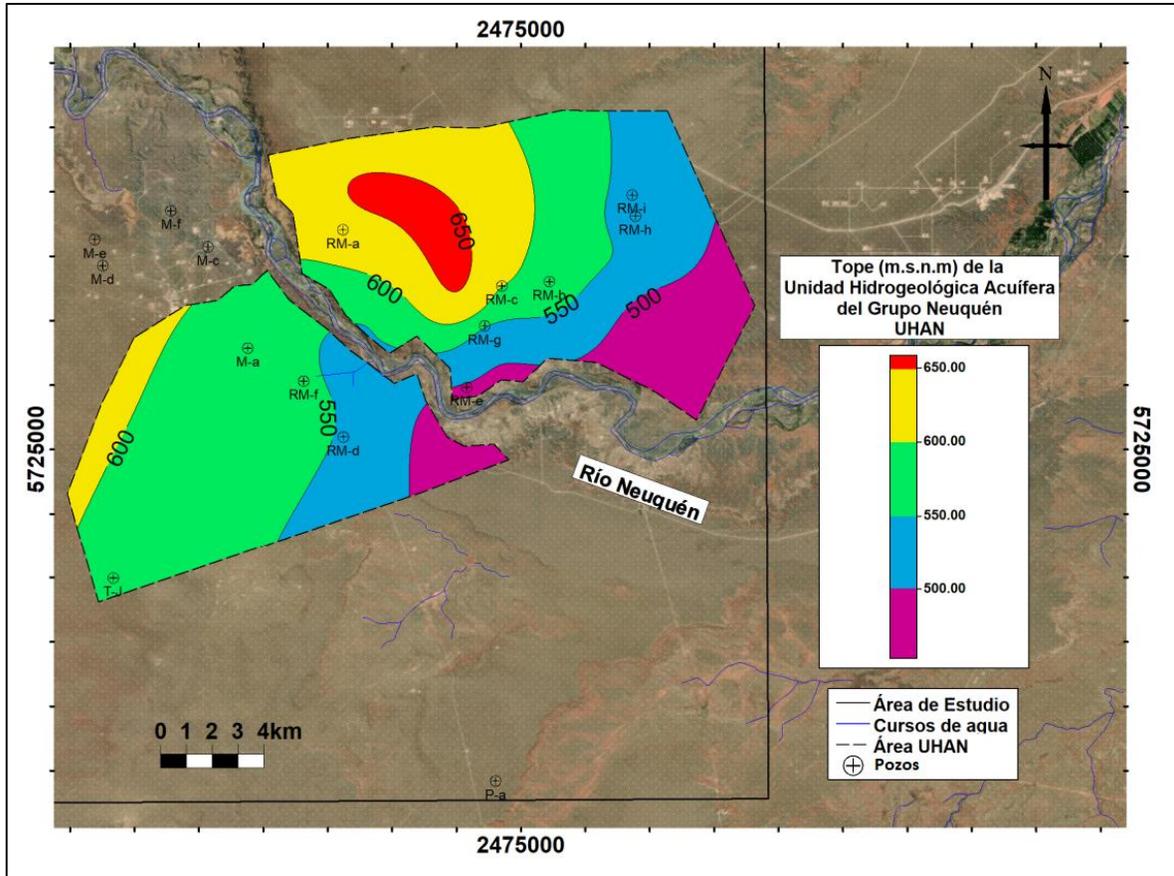


Figura 623: Tope (m.s.n.m) de la Unidad Hidrogeológica acuífera de la Formación Rayoso.

14.2.3.2 Espesor

El espesor acuífero de la unidad se va engrosando hacia el este en consecuencia a que existe mayor depositación del Subgrupo Río Limay en el sector este de la UHAN (figura 64). En esta área la Fm. Huincul y la parte superior de la Fm. Candeleros funcionan como niveles acuíferos de entre 150 y 300 m.

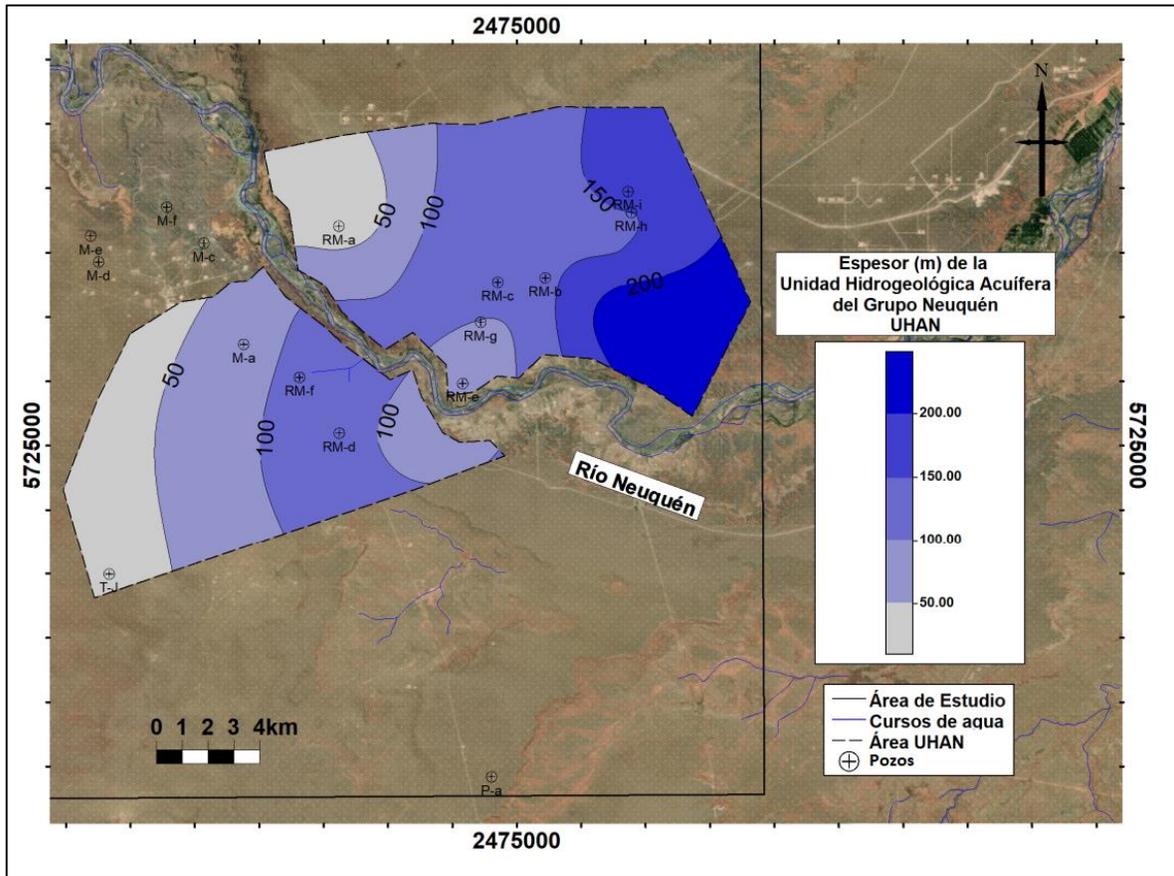


Figura 634: Espesor (m) de la Unidad Hidrogeológica Acuífera del Grupo Neuquén.

14.2.3.3 Profundidad

En la figura 65 se observa la profundidad a la que se encuentra la unidad desde superficie. La menor distancia entre la superficie y la unidad acuífera se encontró los pozos RM-a y T-J siendo estas de 20.48 y 26.45 m respectivamente.

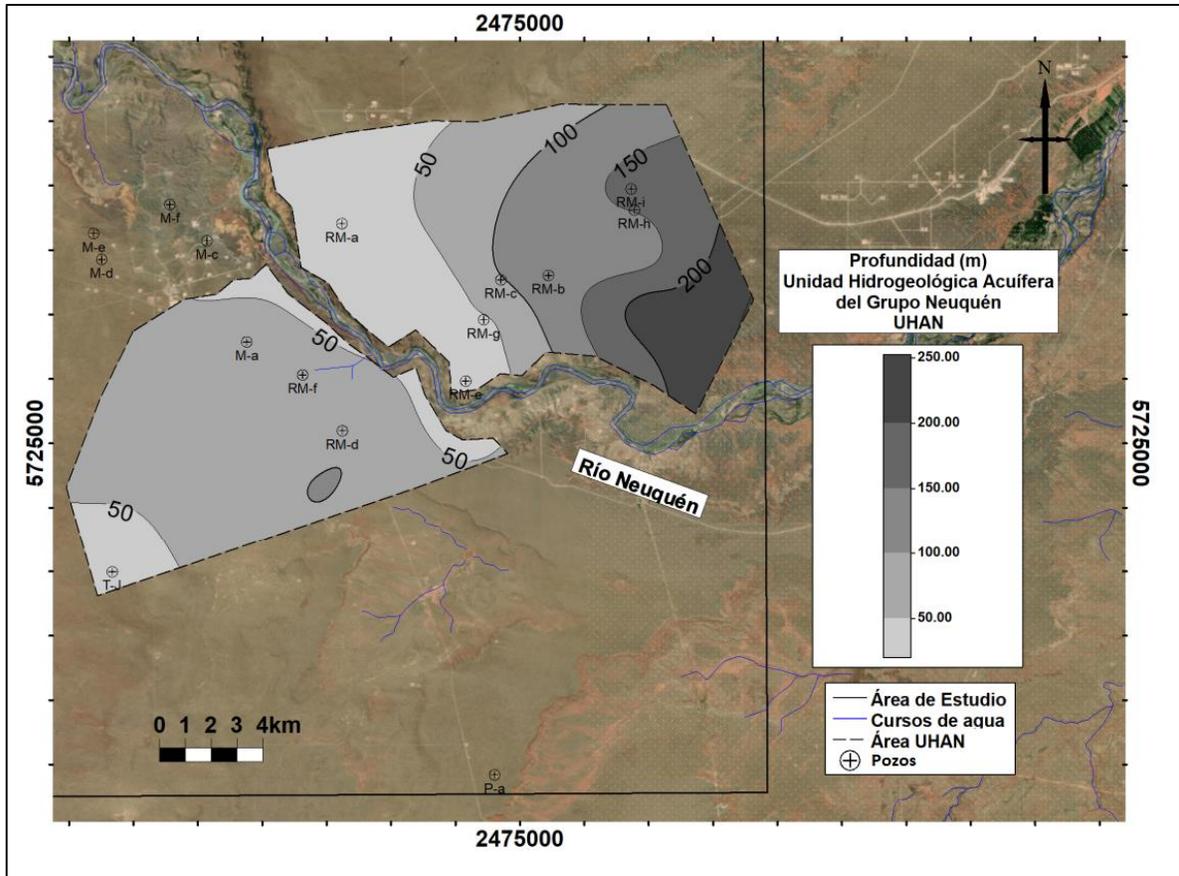


Figura 645: Profundidad (m) aproximada de la Unidad Hidrogeológica Acuifera del Grupo Neuquén.

14.2.3.4 Propiedades petrofísicas

En la figura 66 se observa que las porosidades promedio de la unidad se encuentran dentro del rango establecido para la consideración de acuíferos. Se observa un aumento generalizado del parámetro hacia el norte.

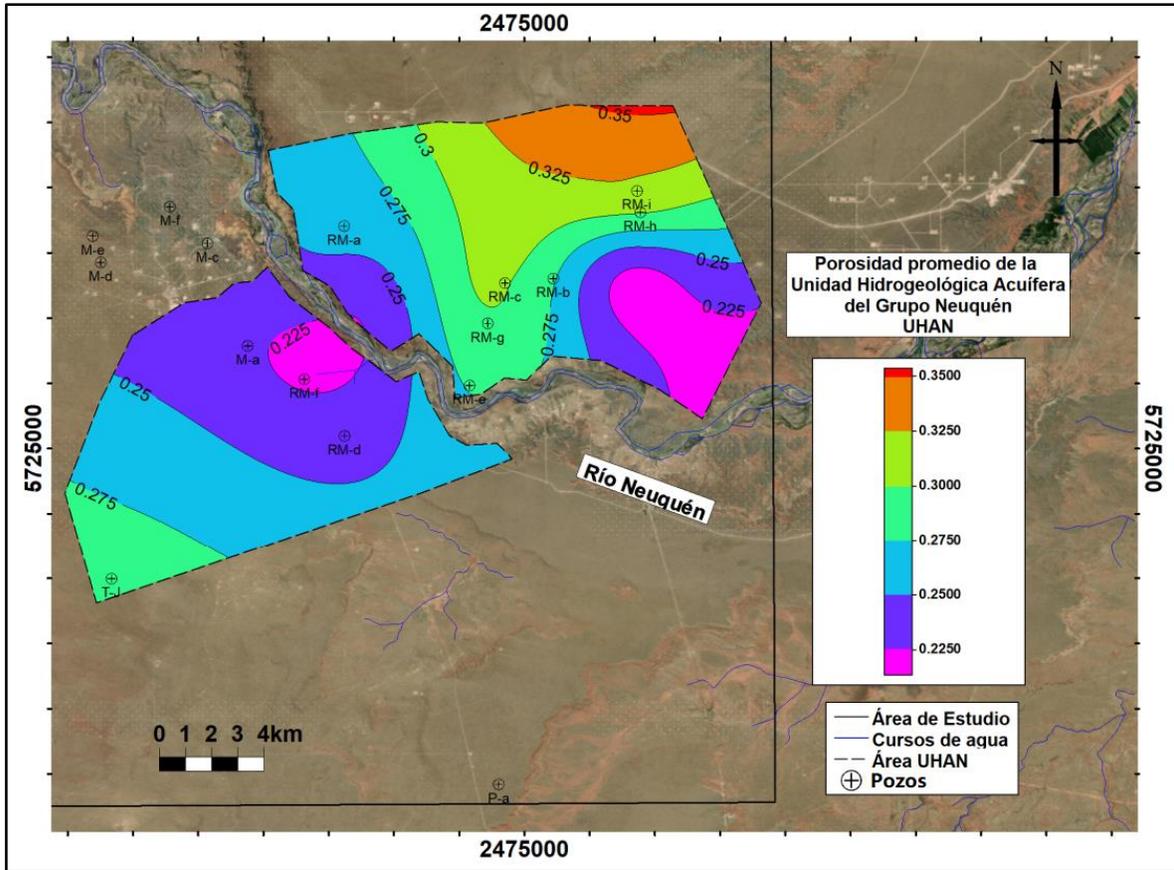


Figura 656: Porosidades promedio de la Unidad Hidrogeológica Acuífera del Grupo Neuquén.

Los valores de volumen de arcilla promedio observados en la figura 67 van desde 10% al este de la UHAN, hasta 25% en las inmediaciones del pozo T-J al suroeste, por lo que se puede estimar un aumento de este parámetro en dirección a la Dorsal de Huincul. En líneas generales la unidad posee buenos valores de volumen arcilloso en el centro y norte del área establecida para la UHAN.

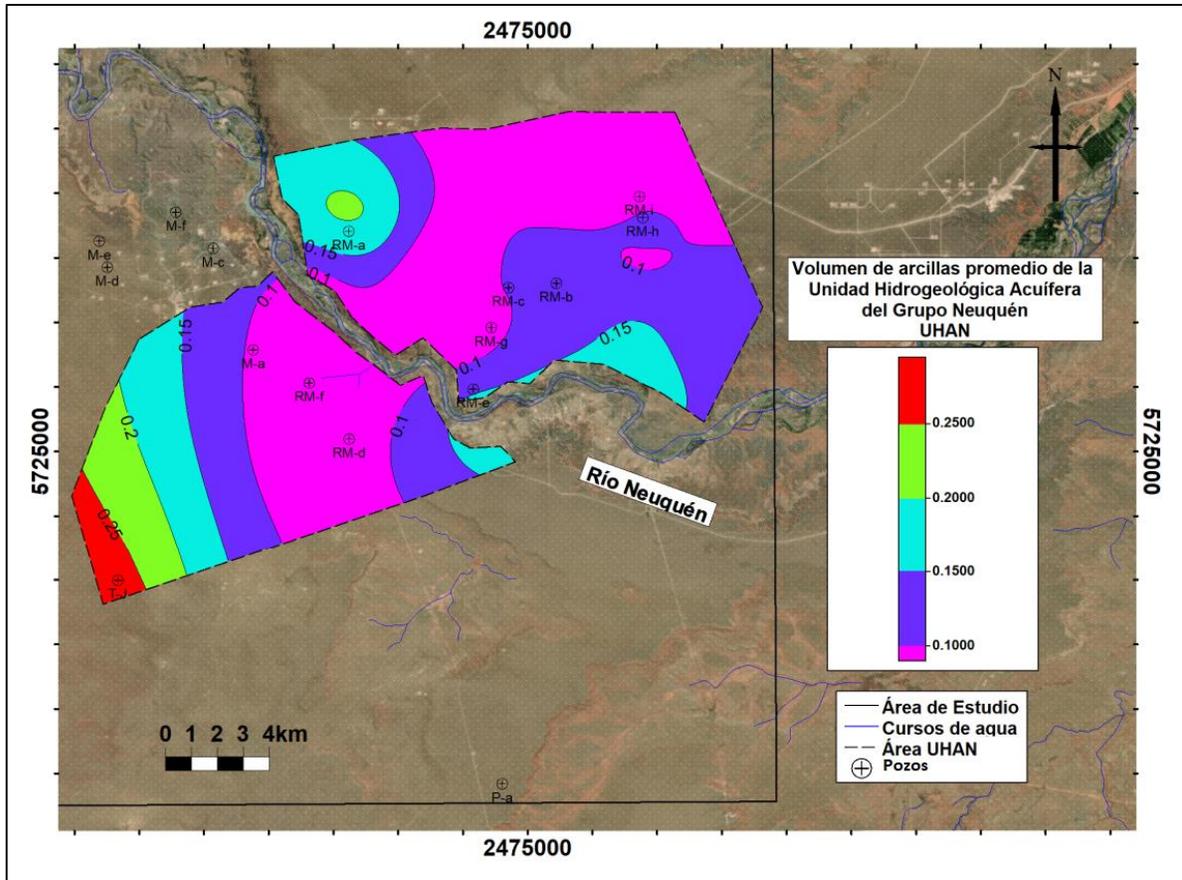


Figura 667: Volúmenes de arcilla promedio de la Unidad Hidrogeológica del Grupo Neuquén.

Las salinidades promedio calculadas de la UHAN indican que existe una menor concentración de sales totales disueltas en dirección al río Neuquén. Se observa que desde el margen izquierdo del río hacia el noroeste de la UHAN la salinidad promedio aumenta gradualmente desde 3000 a 4250 ppm eq. NaCl. Desde el margen derecho aumenta en dirección suroeste desde 3000 a 3500 ppm eq. NaCl.

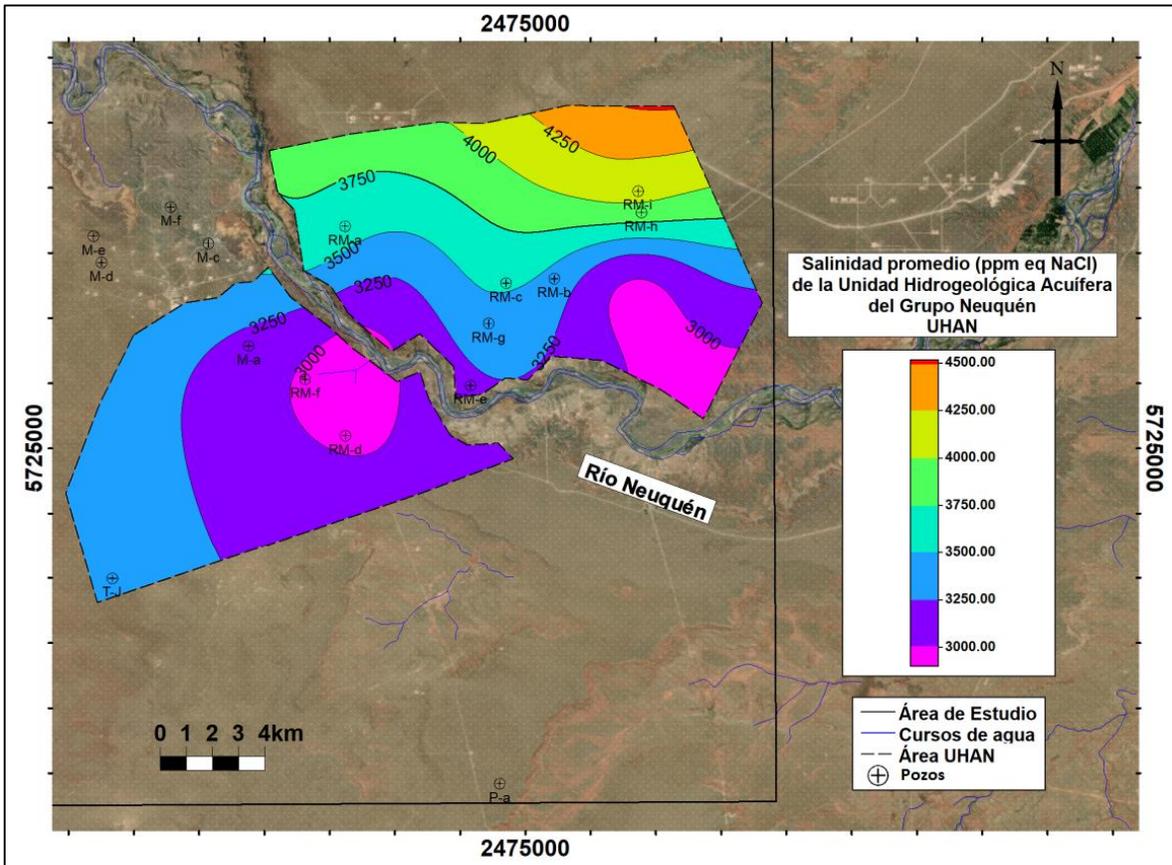


Figura 678: Salinidades promedio (ppm eq NaCl) de la Unidad Hidrogeológica Acuifera del Grupo Neuquén.

Al igual que la salinidad, la resistividad promedio medida de la UHAN aumenta en dirección al río Neuquén. La máxima medida es de 120 Ohm.m en el centro de la unidad. Desde allí reduce su valor medio tanto en dirección norte noreste desde el margen izquierdo, como en dirección suroeste desde el margen derecho del río.

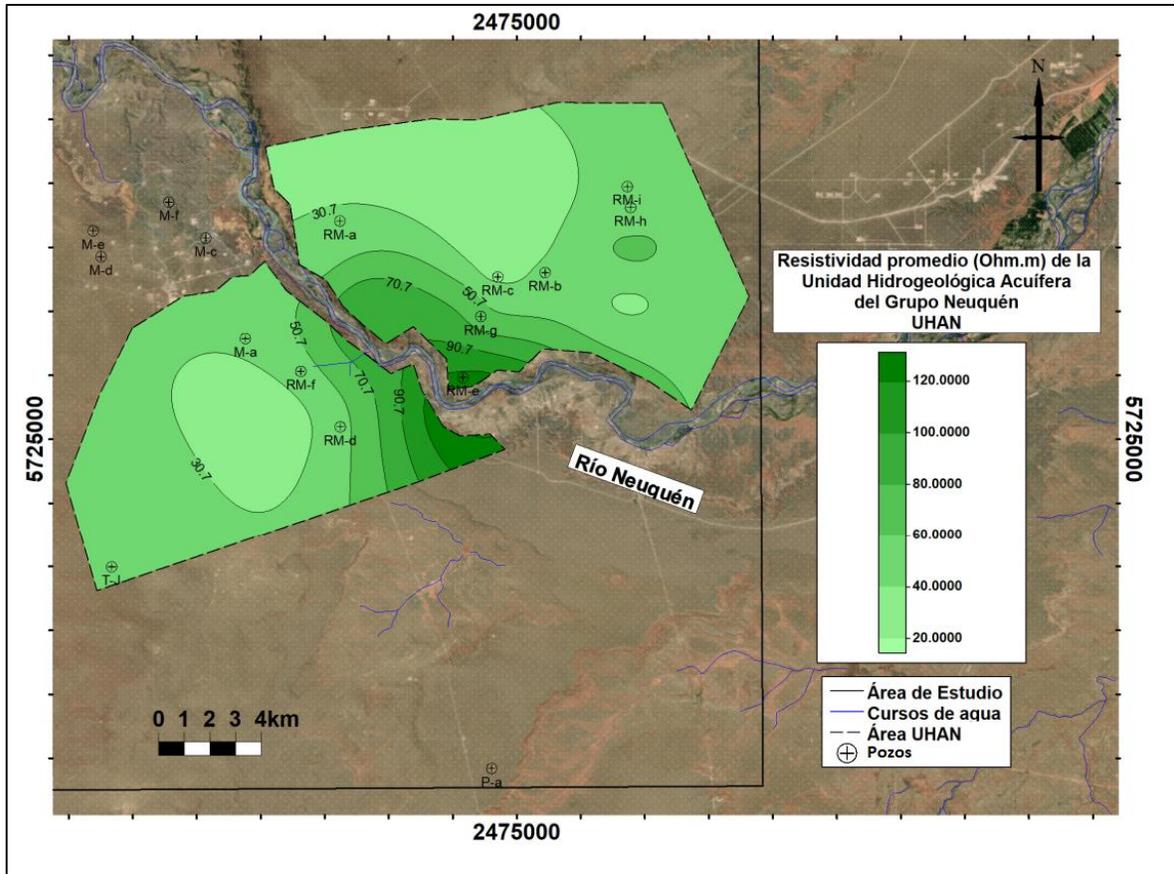


Figura 68: Resistividades promedio (Ohm.m) de la Unidad Hidrogeológica Acuífera del Grupo Neuquén.

14.2.3.5 Síntesis hidrogeológica.

Según los resultados obtenidos a través del procesamiento e interpretación de perfiles eléctricos, la UHAN tiene buenas aptitudes acuíferas en zonas de hasta 3 o 4 km de distancia al río Neuquén a lo largo todo del cauce dentro de la UHAN. Esto permite inferir que la unidad se recarga desde el río con aguas frescas de bajo contenido de sales disueltas.

15 CALIDAD DEL AGUA

15.1 Agua dulce

Agua dulce es un término que se utiliza para describir el agua fresca que no es salada ni salobre, y que es apta para el consumo humano, el riego y otros usos. Como se observa en la tabla 11 el tipo de agua es clasificada según su contenido en sólidos totales disueltos.

En el agua dulce las sustancias químicas presentes dominantes son las que se encuentran en forma de iones, y en menor medida iones complejos o moléculas.

Tabla 11: Tipo de agua subterránea en base al total de sólidos disueltos (TDS). Extraído de Davis y De Wiest 1967.

Curva	TDS en mg/l (ppm)
Dulce	≤1000
Salobre	1000 - 10000
Salada	10000 - 100000
Salmuera	≥100000

Según su concentración, los iones pueden clasificarse como:

15.1.1 Componentes mayoritarios (mayor a 5 mg/L)

- Cloruros (Cl^{-2})
- Sulfatos (SO_4^{-2})
- Carbonatos (CO_3^{-2})
- Bicarbonatos (HCO_3^{-})
- Sodio (Na^{+})
- Calcio (Ca^{+2})
- Magnesio (Mg^{+2})
- Potasio (K^{+})

15.1.2 Componentes minoritarios (menor a 5 mg/L)

- Nitratos (NO_3^{-})
- Nitrito (NO_2^{-})
- Fluoruros (F^{-})
- Hierro (II) (Fe^{+2})
- Amonio (NH_4^{+})
- Estroncio (Sr^{+2})

15.2 Agua potable

El agua dulce puede contener diversos tipos de contaminantes, como bacterias, virus, metales pesados, productos químicos y otros contaminantes que pueden ser perjudiciales para la salud humana si se consumen sin tratamiento. El agua potable se somete a un proceso de tratamiento y purificación que puede incluir la eliminación de estos contaminantes, así como la adición de productos químicos como el cloro para matar las bacterias y virus presentes en el agua.

La definición de agua potable en la nación argentina está regida por el artículo 982 - (Resolución Conjunta SPRyRS y SAGPyA N° 68/2007 y N° 196/2007) del código alimentario Argentino, y dice que:

Con las denominaciones de Agua potable de suministro público y Agua potable de uso domiciliario, se entiende la que es apta para la alimentación y uso doméstico: no deberá contener sustancias o cuerpos extraños de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo en tenores tales que la hagan peligrosa para la salud. Deberá presentar sabor agradable y ser prácticamente incolora, inodora, límpida y transparente. El agua potable de uso domiciliario es el agua proveniente de un suministro público, de un pozo o de otra fuente, ubicada en los reservorios o depósitos domiciliarios.

Según el Código Alimentario Argentino el agua potable deberá cumplir con las características físicas y químicas siguientes:

15.2.1 Características físicas

- Turbiedad: máx. 3 N T U (*Nephelometric Turbidity Unit*):
- Color: máx. 5 escala Pt-Co;
- Olor: sin olores extraños.

15.2.2 Características químicas:

- pH: 6,5 – 8,5;
- pH sat.: pH \pm 0,2.

15.2.3 Sustancias inorgánicas

Tabla 12: Valores máximos permitidos en (mg/l) de las sustancias inorgánicas presentes en agua potable.

Sustancia	Valor máximo (mg/l)	Sustancia	Valor máximo (mg/l)
Amoníaco (NH ₄ ⁺)	0,20 mg/l	Cianuro (CN ⁻)	0,10 mg/l
Antimonio	0,02 mg/l	Cinc (Zn)	5,0 mg/l
Aluminio residual (Al)	0,20 mg/l	Cloruro (Cl ⁻)	350 mg/l
Arsénico (As)	0,01 mg/l	Cobre (Cu)	1,00 mg/l
Boro (B)	0,5 mg/l	Cromo (Cr)	0,05 mg/l
Bromato	0,01 mg/l	Dureza total (CaCO ₃)	400 mg/l
Cadmio (Cd)	0,005 mg/l	Manganeso (Mn)	0,10 mg/l
Mercurio (Hg)	0,001 mg/l	Níquel (Ni)	0,02 mg/l
Nitrato (NO ₃ ⁻)	45 mg/l	Nitrito (NO ₂ ⁻²)	0,10 mg/l
Plata (Ag)	0,05 mg/l	Plomo (Pb)	0,05 mg/l
Selenio (Se)	0,01 mg/l	Sólidos disueltos totales	1500 mg/l
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	400 mg/l		

15.2.4 Contaminantes orgánicos:

Tabla 13: Valores máximos permitidos en (mg/l) de contaminantes orgánicos presentes en agua potable.

Sustancia	Valor máximo (µg/l)	Sustancia	Valor máximo (µg/l)
THM	100 µg/l	Aldrin + Dieldrin	0,03 µg/l
Clordano	0,30 µg/l	DDT (Total + Isómeros)	1,00 µg/l
Detergentes	0,50 mg/l	Heptacloro + Heptacloroepóxido	0,10 µg/l
Lindano	3,00 µg/l	Metoxicloro	30,0 µg/l
2,4 D	100 µg/l	Benceno	10 µg/l
Hexacloro benceno	0,01 µg/l	Monocloro benceno	3,0 µg/l
1,2 Dicloro benceno	0,5 µg/l	1,4 Dicloro benceno	0,4 µg/l
Pentaclorofenol	10 µg/l	Triclorofenol	10 µg/l
Tetracloruro de carbono	3,00 µg/l	1,1 Dicloroeteno	0,30 µg/l
Tricloro etileno	30,0 µg/l	1,2 Dicloro etano	10 µg/l
Cloruro de vinilo	2,00 µg/l	Benzopireno	0,01 µg/l
Tetra cloro eteno	10 µg/l	MetilParatión	7 µg/l
Paratión	35 µg/l	Malatión	35 µg/l

15.3 Evolución del agua

Cuando el agua de lluvia o de deshielo recarga un acuífero lo hace con un contenido iónico inicial escaso. A medida que el agua se infiltra a través de la zona no saturada y la zona saturada, ocurre una interacción agua-fase sólida por la que sustancias químicas y especies disueltas se van incorporando al agua subterránea (Lillo 2007).

Hasta que el agua vuelve a salir al exterior en un río, manantial o captación pueden transcurrir unos días o miles de años, y el recorrido puede ser de unos metros o varios kilómetros (Sánchez San Román 2012). Entonces la evolución química del agua también va a depender del tiempo de residencia en el subsuelo y de la velocidad del flujo subterráneo.

Como norma general se observa que cuanto mayor sea el tiempo de residencia en el terreno, mayor será la salinidad del agua. Esto es relativo teniendo en cuenta que, por ejemplo agua que se encuentre en contacto con cuarzo por varios años será menos salina que si estuviese en contacto con cloruro sódico solo por algunas horas. Entonces la composición mineralógica de los acuíferos también son un factor clave en el intercambio iónico agua-fase sólida.

Habitualmente las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas, luego predomina el sulfato, y las aguas más salinas son cloruradas. Este patrón evolutivo del agua subterránea se conoce como secuencia de Chebotarev (1955) (figura 70).

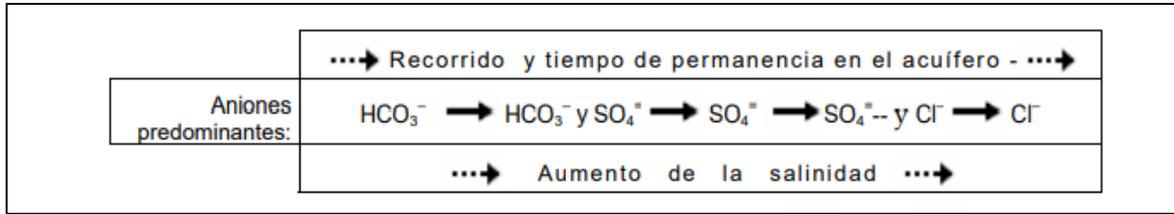
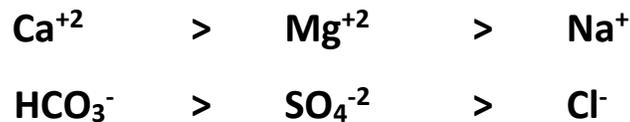


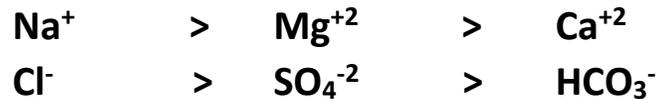
Figura 690: Secuencia de Chebotarev. Extraído de Sánchez San Román (2012).

La secuencia de Chebotarev propone la evolución iónica de un agua recién infiltrada a una con mayor tiempo de residencia de la siguiente manera:

- La concentración de iones en aguas recién infiltradas:



- Después de un largo tiempo de residencia la evolución se invierte:



15.4 Diagramas de representación de las características químicas del agua

15.4.1 Diagrama de Stiff

Un diagrama de *Stiff* (Stiff 1951) es una representación gráfica de los procesos geoquímicos que ocurren en los sistemas de agua subterránea. Se utiliza para comprender la química del agua subterránea y cómo cambia con el tiempo. Se construye ploteando la concentración de iones mayoritarios en meq/L que se encuentran en aguas subterráneas como calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), sodio (Na^{+2}), potasio (K^+), carbonato (CO_3^{-2}) bicarbonato (HCO_3^-), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}) y nitrato (NO_3^-) en un gráfico, con el eje “y” representando el logaritmo de la concentración y el eje “x” el rango de anión a catión (figura 71).

Este diagrama sirve para identificar las interacciones dominantes que existen entre el agua y las rocas de un acuífero. Por ejemplo si el gráfico indica un mayor contenido de sodio en la muestra de agua, este sugiere que el agua intercambié iones con minerales ricos en sodio como los feldespatos. Además puede ser representado en mapas para visualizar la distribución geográfica de los distintos tipos de aguas muestreadas.

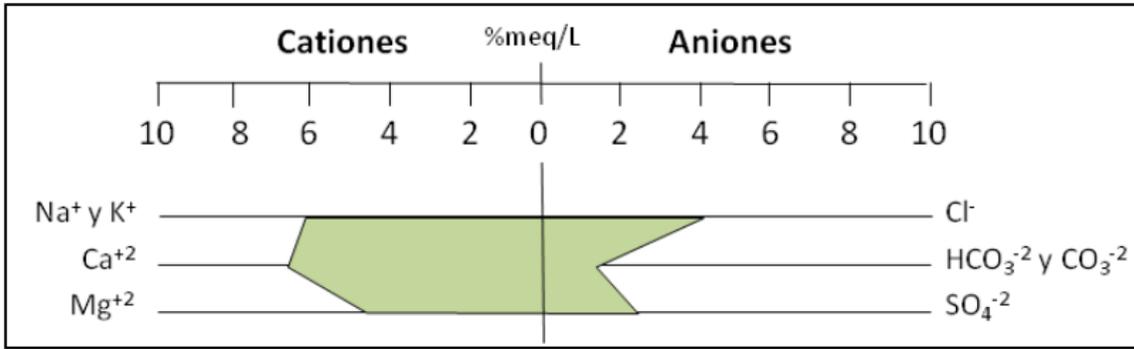


Figura 701: Representación de las concentraciones de cationes y aniones en un diagrama de Stiff. Extraído de Alonso (2016).

15.4.2 Diagrama de Piper-Hill- Langelier

Arthur M. Piper en 1944 diseñó un efectivo procedimiento gráfico para presentar los datos de la química de muestras de agua. Esta representación está formada por dos triángulos y un rombo en el centro que combina la información de ambos (figura 72). En el triángulo de la izquierda se representan los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ \text{K}^+$), en el de la derecha los aniones (HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-) y en el rombo se proyectan los puntos representados en ambos triángulos.

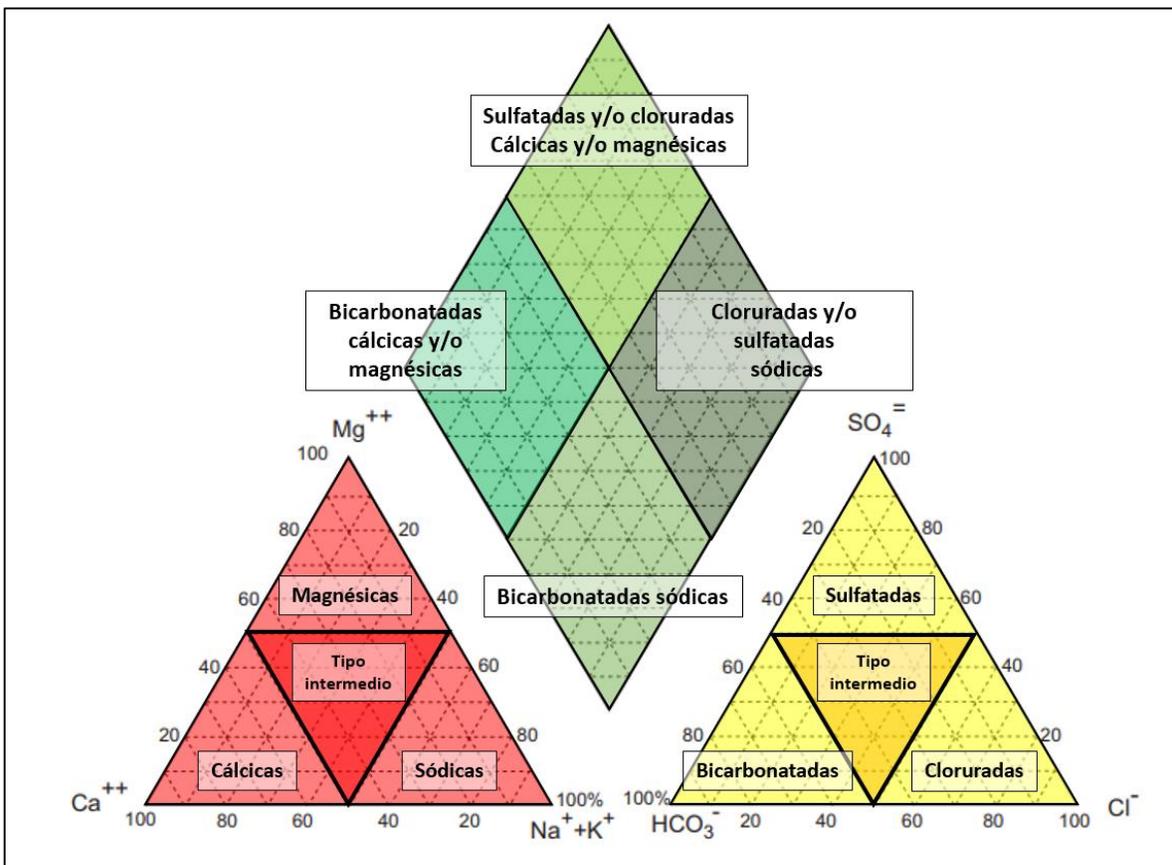


Figura 712: Diagrama de Piper-Hill-Langelier y sus respectivas facies hidroquímicas. Modificado de Sánchez San Román (2012).

Este diagrama muestra la composición hidroquímica del agua estableciendo distintas facies hidroquímicas. Lillo (2007) relaciona la composición hidroquímica de los distintos tipos de agua con su origen de la siguiente manera:

- **Sulfatadas cálcicas:** típicas de aguas subterráneas en contacto con yeso o residuales de drenaje de minas.
- **Bicarbonatadas Cálcicas:** es la composición típica de aguas subterráneas frescas y someras.
- **Cloruradas sódicas:** son aguas de origen marino profundo y antiguo.
- **Bicarbonatadas Sódicas:** son aguas subterráneas frescas influenciadas por el intercambio iónico.

15.5 Resultados de los análisis hidroquímicos de muestras de agua disponibles

Se utilizaron un total de 14 análisis hidroquímicos de muestras de agua a diferentes profundidades provenientes de cuatro pozos localizados al sureste del área de estudio (figura 73) para generar los diagramas de Stiff y Piper-Hill-Langelier.

Los análisis hidroquímicos en la tabla 14 muestran que los acuíferos generalmente poseen valores de sulfatos, cloruros, detergentes, dureza y hierro total por encima de los permitidos por el Código Alimentario Argentino. También se observa que las muestras del pozo más distal al río Neuquén (RM-h) poseen Boro, que es un elemento tóxico para el ser humano.

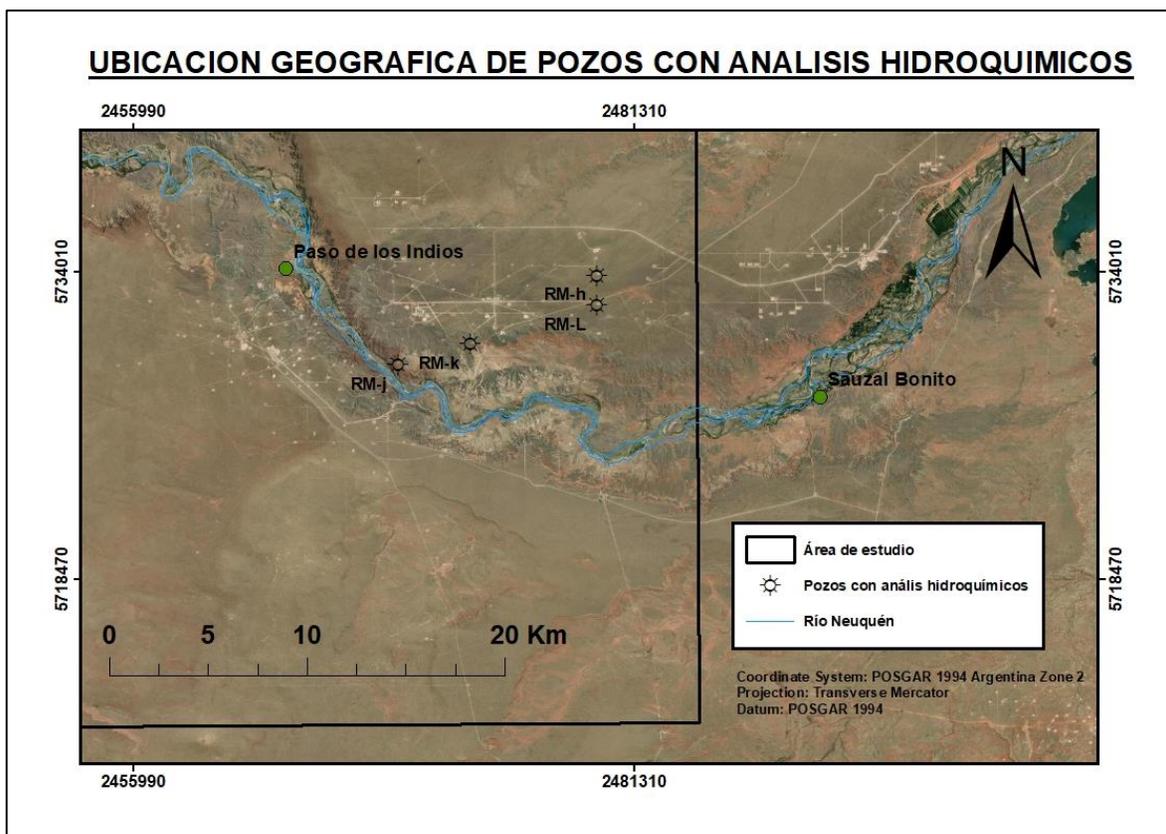


Figura 723: Ubicación geográfica de los pozos con análisis hidroquímicos utilizados.

Tabla 14: Análisis hidroquímicos de muestras de agua (Concentración de iones en mg/l). En rojo se resaltan los valores que están por encima de los permitidos por el Código Alimentario Argentino, y en amarillo los valores que coinciden con el límite.

Muestras Parámetros	RM- L253	RM- L299	RM- h303	RM- k342	RM- k422	RM- k462	RM- k476	RM- k508	RM- k515	RM- j518	RM- j601	RM- h640	RM- L710	RM- h746
Profundidad (m)	253	299	303	342	422	462	476	502	515	518	601	640	710	746
T°C	22	-	-	18,5	18,4	18,8	18,8	18,8	-	25,5	24,5	-	-	-
pH	8,03	8,3	9,1	7,3	7,4	8,18	8,2	8,04	7,82	7,57	7,4	9,1	7,9	8,8
Conductividad $\mu\text{ohm/cm}$	15430	21100	8240	2480	2820	2410	2800	3760	-	10980	16830	2940	11630	4440
Ca ⁺²	400	801,6	440,9	96,2	144	53,4	60,1	48,1	40,8	120	160	67,33	320	86,5
Mg ⁺²	60,7	60,4	24,2	9,72	19,4	4,8	7,29	6,48	7,29	48,6	48,6	13,52	24,2	5,8
Na ⁺	194,9	6,56	611,7	372	388	428	525	664	1553	1352	1528	191,9	12,5	406,6
K ⁺	2500	3500	310	116	136	104	103	100	50,4	5	-	280	1550	260
HCO ₃ ⁻	976	575	507,5	453,8	717,4	629	692,9	858,8	795,4	2502	2562	409,9	683	663,3
CO ₃ ⁺²	0,1	9,6	0,1	-	-	1,2	2,4	0,6	-	-	-	0,1	0,1	0,1
SO ₄ ⁺²	3500	5250	2250	105	85	52,5	95	82,5	82,5	115	125	500	2250	700
Cl ⁻	305,9	557,8	440,9	540	560	460	560	660	2000	900	1200	101,6	189,5	130,3
NO ₃ ⁻³	12	40	<4	-	-	-	-	-	-	-	-	<4	11	<4
NO ⁻²	<0,001	<0,001	<0,005	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,005	<0,001	<0,005
CN ⁻	<0,001	<0,001	<0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,001	<0,001	<0,001
Pb	0,005	<0,003	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	0,035	0,005	0,01
As	<0,005	<0,005	0,005	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	<0,005	<0,005
Hg	<0,001	<0,001	<0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,001	<0,001	<0,001
B	0,1	<0,1	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	<0,1	0,5
F	1,65	4,3	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	2,62	1,5
Zn	2,92	0,6	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	0,39	1,38	0,36
Fe total	2,82	0,6	0,38	3,25	6	2	5,75	2,25	-	3,25	3,75	0,2	0,5	0,22
Detergentes	1,676	4,132	0,305	-	-	-	-	-	-	-	-	0,225	1,589	2,111
Dureza total	1251	2551	-	280	440	153,3	180	146	-	500	600	-	900,7	-
Hidrocarburos totales	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1015	1530	-	-	-

15.5.1 Diagramas de Stiff

Se graficaron en varios diagramas de *Stiff* la concentración de iones de las 14 muestras correspondientes a diferentes profundidades de los pozos analizados para entender la evolución del agua subterránea en esa zona de estudio (figura 74).

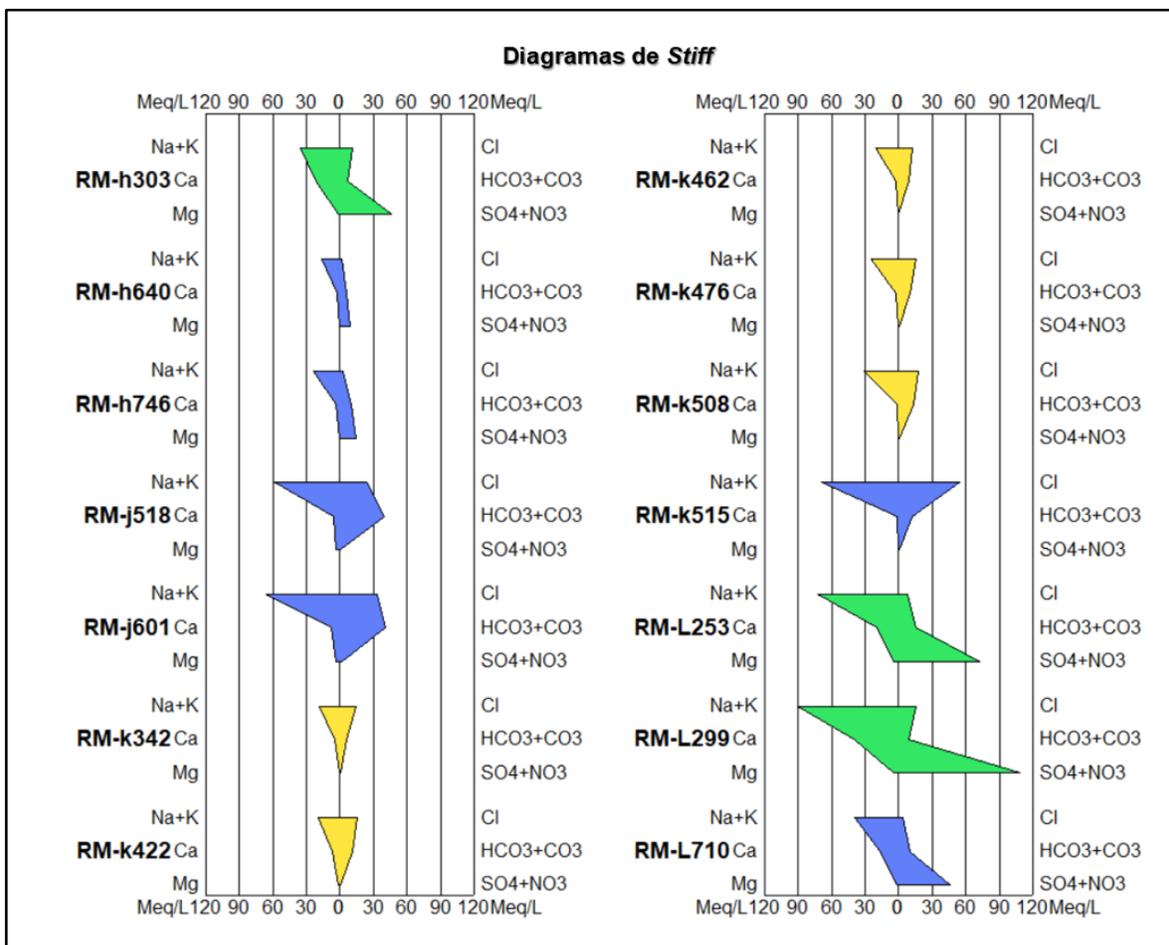


Figura 734: Representación en el diagrama de Stiff de los análisis hidroquímicos. Se pintaron de verde los análisis tomados de la UHAN, en amarillo de la UHASR y en azul los de la UHAIR.

Aprovechando la ventaja de que este tipo de diagramas se pueden incorporar a mapas, en la figura 75 se representaron los diagramas de Stiff de cada análisis hidroquímico utilizado en los pozos correspondientes.

Se pudo observar que en el pozo RM-j, el más cercano al río Neuquén, la composición química del agua contiene mayor proporción de bicarbonatos que de cloruros. Esta relación se invierte en el pozo RM-k, el cual se encuentra más alejado del cauce, dando a entender que los acuíferos podrían recibir agua fresca desde el río que luego evoluciona en forma progresiva a aguas cloruradas, mezclándose con otras más antiguas al noreste del río. En los pozos RM-h y RM-L predomina el ion SO_4^{2-} indicando que en este sector el agua subterránea tiene una estrecha relación con la disolución de yeso y anhidritas.

Los análisis hidroquímicos RM-k342, RM-k422, RM-k462, RM-k476 y RM-k508 tienen composiciones similares donde se observa un aumento progresivo del contenido de Na^+ y K^+ con la profundidad. En la transecta de la figura 76 se observa que las muestras RM-k462, RM-k476 y RM-k508 no se localizan dentro del rango de ninguna UH asignada por perfiles eléctricos en el pozo cercano RM-g, sin embargo se estimó que provienen de la UHASR por sus similitudes hidroquímicas con las muestras RM-k342 y RMk-422.



Figura 745: Ubicación geográfica de los diagramas de *Stiff* en cuatro pozos dentro del área de estudio.

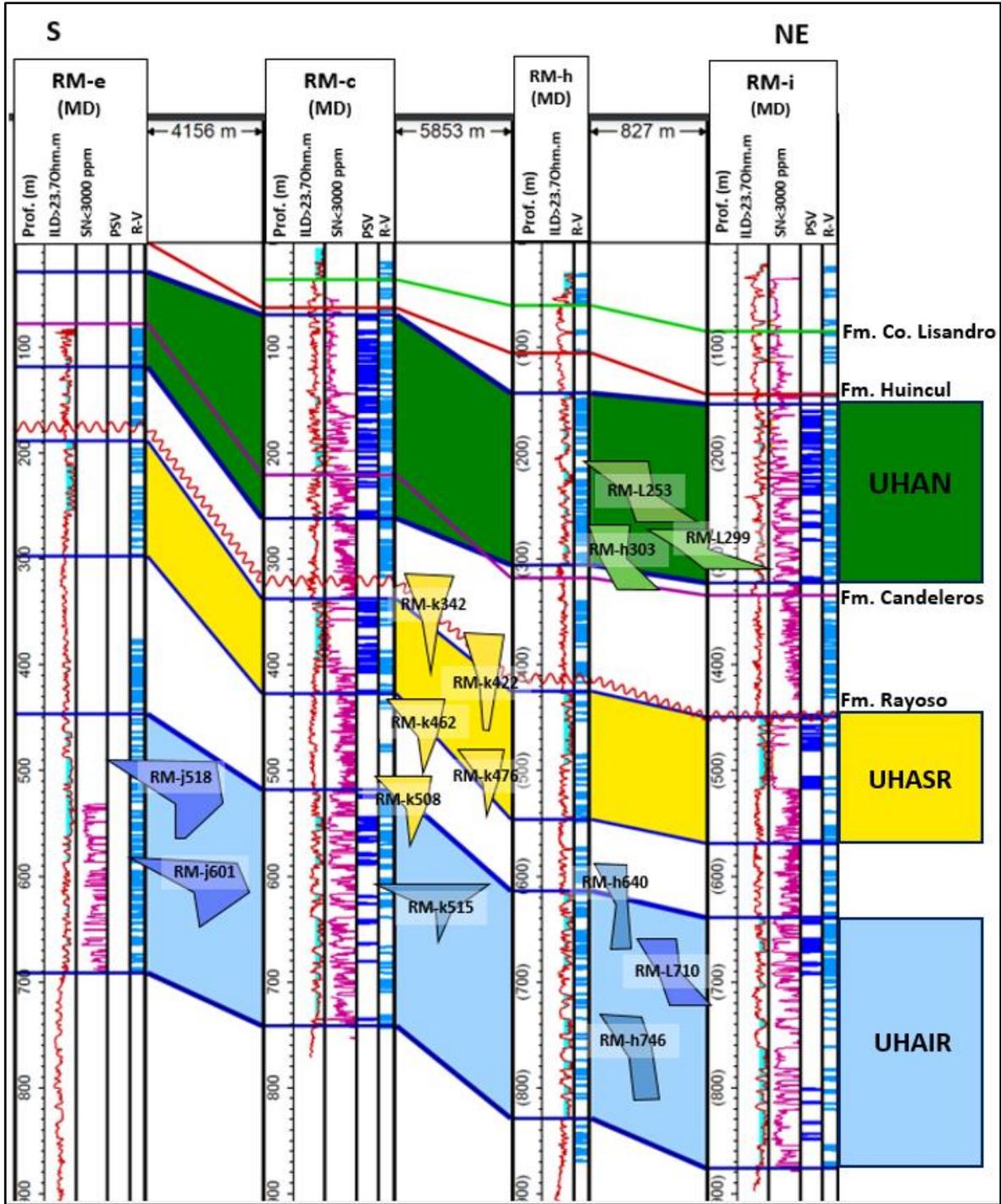


Figura 756: Vista MD de la Transecta RM-e/RM-i con dirección oeste-este entre los pozos RM-e, RM-g, RM-h y RM-i que muestra la ubicación aproximada de las muestras hidroquímicas en las unidades hidrogeológicas generadas por perfiles eléctricos en pozos cercanos. Se muestran los perfiles de resistividad, salinidad y los criterios PSV y R-H, utilizados para la caracterización de unidades hidrogeológicas.

Tabla 15: Caracterización sintética de las unidades hidrogeológicas descriptas según su litología, petrofísica y clasificación hidroquímica.

	Litología	Resistividad promedio (Ohm.m)	Porosidad promedio (%)	Vol. Arcillas promedio (%)	Salinidad promedio (ppm eq. NaCl)	Clasificación Hidroquímica (Piper-Hill-Langelier)
UHAIR	Intercalaciones de areniscas finas y limosas. Paquetes arcillosos y limoarcillosos como acuicludos y acuitardos	45.19	20.97	24.72	10517	Bicarbonatada sódica cerca del río a clorurada/sulfatada sódica al este
UHASR	Llimoarcilitas arenosas, areniscas finas a medianas, cuarzosas y subangulares, en algunos casos con matriz arcillosa	57.52	27.81	21	4105	Bicarbonatada sódica a clorurada sódica al aumentar la profundidad
UHAN	Areniscas finas a medias y gruesas con baja matriz arcillosa y poco consolidada	50.30	33.53	14.14	4056	Sulfatada/clorurada sódica

16 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a las escasas precipitaciones anuales que ocurren en la región del Dorso de los Chihuidos y al sur del río Neuquén, es fundamental que se realicen estudios geológicos e hidrogeológicos que permitan identificar unidades hidrogeológicas y determinar la calidad de agua subterránea que contienen.

Con los estudios realizados en este trabajo con registros de pozo para realizar interpretaciones estratigráficas en la zona de estudio se pudo concluir que:

- Los registros eléctricos de rayos gamma y sínicos resultaron los más útiles a la hora de establecer límites litoestratigráficos entre las formaciones. Por su parte el perfil resistivo fue de gran utilidad para identificar a los niveles evaporíticos de la Fm. Huitrín, teniendo en cuenta que se optó por atribuir al miembro Salinas a la Fm. Rayoso.
- Los pases formacionales entre las unidades del Gr. Neuquén no fueron tan evidentes en los registros y control geológico, sumado a que la mayor parte de los pozos no poseían información en las profundidades de emplazamiento del grupo. Por este motivo se decidió apoyarse, además, en datos de afloramientos de la Hoja Geológica Zapala 6939-I y trabajos académicos de la zona como los de Alonso (2016) y Pons et al. (2011).
- Dentro de la Fm. Agrio fue posible identificar la base del miembro Agua de la Mula en los registros de rayos gamma y sínico según la secuencia transgresiva basal descrita por Spalletti et al. (2001).

Las interpretaciones petrofísicas para la identificación y caracterización de unidades hidrogeológicas acuíferas permitieron sugerir las siguientes conclusiones:

- El análisis petrofísico con perfiles eléctricos resulta ser una herramienta muy útil para identificar y mapear unidades hidrogeológicas acuíferas en subsuelo mediante el *software* Petrel 2017.4.
- La profundidad en la que comienzan los registros resultó ser un gran condicionante que llevó a contraer el área de análisis hidrogeológicos. Esto se debió a que la mayor parte de los pozos poseían registros que comenzaban a profundidades elevadas ya que su misión era localizar hidrocarburos a profundidades generalmente mayor a mil metros.
- Se identificaron dos unidades hidrogeológicas acuíferas dentro de la Fm. Rayoso, pero que podrían seguir siendo subdivididas, dado que las características litológicas de la formación varían según la unidad morfoestructural involucrada. Esto se ve, por ejemplo en el alto contraste de salinidades observadas entre la FPC y centro este del área asignada a la UHASR.

Con respecto a cada una de las unidades hidrogeológicas acuíferas identificadas se pudo concluir que:

- UHAIR: El espesor máximo de la unidad se localiza al este del área delimitada, con aproximadamente 200 m. Allí el volumen de arcillas promedio va de 10 a 20%. La porosidad promedio es de 20 a 30% en toda su extensión. Lamentablemente los valores de salinidad promedio son bastante altos, haciendo que la unidad contenga agua salada en mayor proporción.
- UHASR: Posee un espesor máximo en el flanco sur del DCh de 100 m. La porosidad promedio va de 30 a 20% al sur del dorso, y en la FPC de 20% a 25%. Los volúmenes de arcillas menores a 20% ocurren al sur y sureste del polígono de la UHASR. Posee salinidades cercanas a 3000 ppm eq NaCl al sur y sureste del Dorso. Las mejores condiciones acuíferas de la unidad ocurren cuanto menor es la distancia al río Neuquén, por lo que podría estar indicando que es el río es una zona de recarga de esta unidad hidrogeológica.
- UHAN: Se ubica sobre la base de areniscas conglomerádicas compactas de la Fm. Candeleros, aunque existen sectores en el que en límite con la UHASR no se encuentra bien definido. Solo se la logró caracterizar al sureste del DCh, debido a la baja profundidad a la que se ubica y a la densidad de pozos con información útil desde superficie o bajas profundidades. El espesor de la UHAN varía de 50 en el suroeste a 200 metros en el este. Si bien tiene buenas aptitudes como acuífero casi toda su área, las mejores condiciones de la unidad ocurren cuanto menor es la distancia al río Neuquén, donde alcanza salinidades cercanas 3000 ppm eq NaCl, porosidades de entre 20 y 35%, resistividades de 120 Ohm.m y volúmenes de arcilla menores a 15%.

A partir de los diagramas de Stiff y Piper-Hill-Langelier realizados con análisis hidroquímicos de muestras de agua en distintos pozos se pudo concluir que:

- La cantidad de muestras utilizadas en este trabajo no fueron suficientes para representar las características geoquímicas del agua subterránea en toda el área de estudio.
- La evolución del agua subterránea, vista entre la ubicación de los análisis hidroquímicos utilizados, incrementa hacia el este desde el río Neuquén.
- Se observaron valores de sulfatos, cloruros, detergentes, dureza y hierro total por encima de los permitidos por el Código Alimentario Argentino.
- En las cercanías del río Neuquén (Pozo RM-j) el agua subterránea es del tipo bicarbonatada sódica, pudiendo suponer que los acuíferos se recargan desde el río.
- Hacia zonas más externas desde el río Neuquén, el agua subterránea se torna clorurada sódica, donde se ubicarían aguas antiguas que podrían mezclarse con aguas más frescas en largos periodos de tiempo.
- En el pozo RM-h se observó un aumento en el contenido de sulfatos, indicando que allí se produjeron fuertes intercambios iónicos con anhidritas y yeso.
- En las muestras RM-h303 y RM-h746 dentro del pozo RM-h se encontró que el contenido de Boro está en el límite de lo permitido por el Código Alimentario Argentino.
- Llevando los diagramas de Stiff a un mapa, se observó que en un área relativamente reducida pueden existir distintos tipos de aguas subterráneas.

Queda asentado que las interpretaciones realizadas no son precisas, y que se dejan abiertas a la disponibilidad de nuevos datos que permitan ampliar el perímetro de investigación. Nuevas investigaciones también podrían determinar si ocurren otras unidades hidrogeológicas dentro de la Fm. Rayoso.

17 BIBLIOGRAFÍA

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. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Comahue (inédita), 105 p., Neuquén.

Angulo Artega, J.M., Velazquez Vazquez, J. 2011. Aplicación de los registros radiactivos en el campo Furbero. Instituto politécnico Nacional, Escuela superior de Ingeniería y Arquitectura, Ciencias de la Tierra (inédita), 99 p., D.F.

Bassiouni, Z. 1994. Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs. SPE textbook series vol. 4. Richardson, Texas.

Benítez, A. 1963. Captación de Aguas Subterráneas, p. 137., Madrid

Bertoni, L., Dufilho, A.C. 2016. Caracterización hidrogeoquímica de acuíferos de la región noreste de la provincia de Neuquén. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea, Actas 7: 264-271, Catamarca.

Bisbé, E. 2007. Curso básico de evaluación de formaciones para operadores de perforación y producción. Centro Politécnico del Petróleo., pp 16-19., Cuba.

Bracaccini, I.O. 1970. Rasgos tectónicos de las acumulaciones mesozoicas en las provincias de Mendoza y Neuquén. Revista Asociación Geológica Argentina, 25 (2): 275-282, Buenos Aires.

Calderón Rincón, F.M., Rincón Chávez, A.C., Marín Trujillo, M., Calderón Carrillo, Z.H., Saavedra Trujillo, N.F. 2009. Cálculo del tiempo de tránsito promedio de la matriz para predecir la porosidad en formaciones usando un estudio estadístico moderado. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol. 7 N° 2.

Chebotarev, I. 1955. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering (1) Geochimica et Cosmochimica Acta 8: 22-48.

Collazo Carballo, M.P., Montañó Xavier, J. 2012. Manual de Agua Subterránea. Ministerio de ganadería, agricultura y pesca. Dirección general de desarrollo rural, Montevideo.

Custodio, E. y Llamas, M. 1976. Hidrología Subterránea. Tomo I. Primera Edición. Editorial Omega. ISBN 84-282-0447-0, Barcelona.

De Ferrarís, C. 1968. El Cretácico del norte de la Patagonia. 3º Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 1: 121 -144. Buenos Aires.

Del Prete, P.J. 2019. Evaluación Isotópica el agua subterránea en el Dorso de los Chihuidos, Provincia de Neuquén. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Comahue (inédita), 59 p., Neuquén.

Digregorio, J.H. 1972. Neuquén. En: Leanza, A.F. (Ed.): Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba 439-506, Córdoba.

Eisner, P. 1991. Tectonostratigraphic evolution of Neuquén Basin, Argentina. Master Thesis, Rice University (inédito), 56 p., Houston.

Enviro Wiki contributors. 2019. Advection and Groundwater Flow, Enviro Wiki, Page Version ID: 12554. En (http://www.enviro.wiki/index.php?title=Advection_and_Groundwater_Flow&oldid=12554).

Ferrer, J.F., Irisarri, J.A., Mendía, J.M. 2006. Suelos de la Provincia del Neuquén. INTA-CFI, Neuquén.

García, R.F. 2018. Apuntes sobre Captación de Aguas Subterráneas. Secretaria de infraestructura y política hídrica Consejo Hídrico Federal. Universidad Nacional de La Pampa, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (inédita), 173p., Buenos Aires.

Garduza Rueda, V.M. 2019. Manual de Registros Geofísicos de Pozo y algunas Aplicaciones. Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros, A.C. Volumen LXI. N°2.

Giusano, A., Cevallos, M., Franchini, M., Carbone, O. y Rainoldi, A. 2014. Evidencias de la circulación de hidrocarburos a través del Grupo Neuquén (Cretácico Superior) en el Dorso Los Chihuidos, Cuenca Neuquina. XIX Congreso Geológico Argentino. Geología de los recursos energéticos. T4-1, Córdoba.

Glover, P.W.J, s.f. Petrophysics. MSv Petroleum Geology, Department of Geology and Petroleum Geology. University of Aberdeen, UK.

Gómez Figueroa, J., Monárdez, C., Balod, M. 2011. El miembro Troncoso Superior de la Formación Huitrín (Cretácico Temprano). Relatorio 18º Congreso Geológico Argentino. Neuquén.

Groeber, P. 1946. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70° 1. Hoja Chos Malal. Revista de la Sociedad Geológica Argentina, 1 (3): 177-208, Buenos Aires.

Heath, R.C. 1983. Basic ground-water hydrology: U.S. Geological survey Water-Supply Paper 2220, 86 p.

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

Howell, J. A., Schwarz, E., Spalletti, L. A. y Veiga, G. D. 2005. The Neuquén Basin: an overview. En: Veiga, G. D., Spalletti, L. A., Howell, J. A. y Schwarz, E. (eds.). The Neuquén Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics. Geological Society, London, Special Publications. 252: 83-107.

Keys, W.S. 1968, Well Logging in Ground-Water Hydrology. VIII Logging Symposium Transactions-Society of Professional Well Log Analysts, 6: 10-18, Denver.

Kirsch, R. 2009. Groundwater Geophysics. A Tool for Hydrogeology. Second Edition. Dr. Reinhard Kirsch. Landesamt fur Natur und Umwelt. Abt. Geologie/Boden. Hamburger Chaussee 25. 24220 Flintbek. Germany.

Laurencena, P. 2015. El agua subterránea en el ámbito de la llanura inferior del río Limay. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional. (En: <http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/id/20161014001473>).

Leanza, H. A., 2003. Las sedimentitas huirinianas y rayosianas (Cretácico inferior) en el ámbito central y meridional de la cuenca Neuquina, Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas - Geología 2: 1-31. Buenos Aires.

Leanza, H.A., Hugo, C.A. 2005. Hoja Geológica 3969- I, Zapala, provincia del Neuquén. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 275, 128 pp., Buenos Aires.

Legarreta, L., Boll, A. 1982. Formación Huirín. Análisis estratigráfico y esquema prospectivo. Yacimientos Petrolíferos Fiscales (Informe inédito). Buenos Aires.

Lillo, J. 2007. Técnicas Hidrogeoquímicas. Tesis (en opción del título de Máster Oficial en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos), Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España. 140pp.

Lillo J. 2012. Técnicas Hidrogeoquímicas. En Máster Oficial en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos, Universidad Rey Juan Carlos. Madrid.

Mandel, S. Shiftan, Z.L. 1981. Groundwater Resources investigation and development. Academic Press, 257p., Londres.

Meconi, G. 2016. Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso (S.A.Ne.Ra.). Sistematización para su uso sustentable en reservorios no convencionales de la cuenca neuquina. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea, Actas 1: 228-237, Catamarca.

Méndez Villegas, R., Gómez Rivera, P., Ledesma Herrera, J.I., Cisneros González, C.M. 2013. Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en Tabasco. Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Vol 2 N°4.

Miall, A., 1996. The geology of fluvial deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology. Springer-Verlag. 575 pp., Italia.

Micucci, E., Bande, A., Strack, D., Veiga R. 2018. El Jurásico del Dorso de los Chihuidos, contribución a su conocimiento. 10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Volumen: Sesiones Generales: "Energía y Sociedad, aliados inseparables" 437-460. Mendoza.

Mosquera, A., Silvestro, J., Ramos, V., Alarcón, M., Zubiri, M. 2011. La estructura de la Dorsal de Huinul. In Congreso Geológico Argentino, No. 8, Actas: 385-397. San Luis.

Morris, D.A., Johnson, A.I. 1967. Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the United States Geological Survey, 1948-60. United States Geological Survey Water-Supply Paper 1839-D, 42 p.

- Orchuela, J., Ploszkiewicz, V., Viñes, R. 1981. Reinterpretación estructural de la denominada Dorsal Neuquina. 8º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 281-293. San Luis.
- Orchuela, I., Ploszkiewicz, V. 1984. La Cuenca Neuquina. En Ramos, V. (ed.) Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Río Negro, 9º Congreso Geológico Argentino (San Carlos de Bariloche), Relatorio: 163-188, Buenos Aires.
- Pángaro F., Pereira D. M., 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.
- Pereyra, F.X., Irisarri, J.A., Ferrer, J.A. 2011. Suelos: factores de formación, procesos pedogenéticos y distribución. 18º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 871-880. Neuquén.
- Pereyra, F.X., 2012. Suelos de la Argentina. Ed. SEGEMAR-AACS-GAEA, Anales N° 50, 178p., Buenos Aires.
- Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. EOS Transactions American Geophysical Union, 25(6), 914–928.
- Ploszkiewicz, J.V., Orchard, I.A., Vaillard, J.C. & Viñes, R.F. 1984. Compresión y desplazamiento lateral en la zona de Falla Huincul: estructuras asociadas, provincia del Neuquén. 9º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 163 169. Buenos Aires.
- Pons, M. J., Giusiano, A., Tunik, M. 2011. Caracterización de la Formación Huincul, (Grupo Neuquén) en el área del prospecto de Cobre Tordillos, Neuquén, Argentina.
- Ramos, V.A. 1978. Estructura. En: Rolleri, E.O. (Ed.): Geología y recursos naturales de la Provincia del Neuquén, 7º Congreso Geológico Argentino (Neuquén), Relatorio 9-24. Buenos Aires.
- Ramos, V.A. 1998. Estructura del sector occidental de la faja plegada y corrida del Agrio, cuenca Neuquina, Argentina. 10º congreso Latinoamericano de Geología, Actas 2: 105-110. Buenos Aires.
- Ramos, V.A., Mosquera, A., Folguera, A., García Morabito, E., 2011. Evolución tectónica de los Andes y del Engolfamiento Neuquino adyacente. Relatorio de la Provincia de Neuquén (2010) (Leanza Ed.): 335-348.
- Reynaldi, J. M., Rodríguez, L. G., Ángel Álvarez, J. B., Herrera, J. M., & María, S. 2021. Estudio hidrogeológico integral del yacimiento de hidrocarburos no convencionales La Calera, Cuenca Neuquina. Procedimientos y resultados. Revista De Geología Aplicada a La Ingeniería y Al Ambiente, (45), 1–17.
- Rodríguez, E. 1990. “Las cárceles” y su significado en la evolución geomorfológica del anticlinal Los Chihuidos. Boletín de Estudios Geográficos, N° 86, 129-141, Neuquén.
- Sánchez San Román, F. J. 2012. Hidráulica Subterránea: Principios básicos. Universidad de Salamanca. 13 pp. (En: https://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf)
- Sánchez San Román, F.J. 2014b. Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. Universidad de Salamanca. 11pp. (En: https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf)

- Serra, O. 1984. Fundamentals of well-log interpretation. *Developments in Petroleum Science*, 15A. Elsevier Science Publishers B.V, 423p., Amsterdam.
- Sigismondi, M.E., Ramos, V. 2008. El flujo de calor de la Cuenca Neuquina, Argentina. VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Simposio de La Geofísica: Integradora del Conocimiento del Subsuelo), cp-261-00006.
- Silvestro, J., Zubiri, M. 2008. Convergencia Oblicua: Modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39°S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(1): 49-64. Neuquén.
- Stipanovic, P. N., Rodrigo, F. 1970. El diastrofismo Eo- y Mesocretácico en Argentina y Chile, con referencias a los Movimientos Jurásicos de la Patagonia. *Actas 4° Jornadas Geológicas Argentinas*, 2:337-352. Buenos Aires.
- Stiff, H.A. 1951. Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Pattern. *Journal of Petroleum Technology*, Vol 192: 376-379. Texas.
- Turic, M., Aramayo Flores, F., Gomez Omil, R., Pombo, R., Peroni, G., Sciutto, J., Robles, D., Cáceres, A. 1987. Formaciones geológicas en Argentina. Secretaría de Energía. 319p., República Argentina.
- Uliana, M. A., D. A. Dellapé y G. A. Pando, 1975a. Distribución y génesis de las sedimentitas rayosianas. (Cretácico inferior de las provincias de Neuquén y Mendoza). 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 1: 151-176. Buenos Aires.
- Veiga, G.D., Vergani, G.D. 2011. El miembro Troncoso Inferior de la Formación Huitrín (Cretácico Temprano), in Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J.C., and Vallés, J.M., eds., *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, 18° Congreso Geológico Argentino, Argentina Asociación Geológica Argentina, p. 181–188.
- Vergani, G.D., Tankard, A.J., Belotti, H.j., Welsink, H.J. 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén basin, Argentina. *AAPG Memoir*. 62:238-402. Tulsa.
- Villegas, F., Jhon.E. 2005. Interpretación de registros de pozo de petróleo. Monografía, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Físicas (inédita), 12 p., Lima.
- Weaver, C. 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west central Argentina. *Memoir University of Washington* 1: 1-469. Seattle.
- Wichmann, R. 1927. Sobre las facies lacustres Senoniana de los estratos con dinosaurios y su fauna. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias* 30(1-4): 383-406.
- Woessner, W., Poeter, E. 2020, *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow*. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., del Pino, D., Ansa, A. 2006. Structural evolution and magmatic characteristics of the Agrío fold-and-thrust belt. En: Kay, S.M. & Ramos, V.A. (Eds.): *Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°–39° S)*, Geological Society of America, Special Paper 407: 125-145. doi:10.1130/2006.2407 (06).

Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Ramos, V.A., Rodríguez, F., Bernardo, L.M. 2009. Evolución tectónica del Frente Andino en Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 192 – 203.

Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Ramos, V.A. 2011. La Faja Plegada y Corrida del Agrio. *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Neuquén. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino*. pp., 367-374. Neuquén.

Zapata, T.R., Folguera, A. 2005. Tectonic evolution of the Andeanfold and thrust belt of the southern Neuquén Basin, Argentina. En: Spalletti, L., Veiga, G., Schwarz, E. & Howell, J. (Eds.): *The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics*: Geological Society, Special Publications 252: 37-56. Londres.