



TRABAJO FINAL DE LICENCIATURA

Zonificación de los acuíferos presentes en un área de los bloques La Amarga Chica, Bandurria Sur y Loma Campana

Autora: Dominguez, Milay

Directora: Zabala, Lorena

Co-directores:

Dufilho, Ana Cecilia

Beatove, Mariana

Garcia, Luciano

Neuquén, 2023

De acuerdo con los contratos de confidencialidad de la empresa algunos de los datos se verán alterados. No obstante, esto no afecta de ningún modo a los resultados obtenidos durante el presente trabajo.

RESUMEN

El siguiente estudio está enfocado en caracterizar los acuíferos presentes en un área de los bloques La Amarga Chica, Bandurria Sur y Loma Campana pertenecientes a la Cuenca Neuquina con el propósito de mejorar la gestión, ampliar el conocimiento, y poder asegurarnos de su protección. Dicho proyecto se realizó en conjunto con YPF S.A. y la Universidad Nacional del Comahue. La empresa YPF S.A. brindó información de la geología de subsuelo, perfiles de pozos, controles geológicos y resultados de muestreos de fluido provenientes de ensayos puntuales en etapa de perforación de pozos (MDT/RCI) o de punzados en etapa de terminación.

Como metodología de trabajo, se pudo clasificar el tipo de agua en base al grado de salinidad perteneciente a cada unidad geológica. También, se realizó una clasificación en cuanto a la aptitud para consumo humano y para riego según todas las normativas vigentes. Por otro lado, se trabajó con los perfiles eléctricos de los pozos en el software “Petrel” generando distintas transectas en diferentes orientaciones del área de estudio, para así poder generar una correlación de las unidades geológicas e interpretar las variaciones en la lateral y en profundidad. En conjunto con lo mencionado anteriormente se generaron gráficos de tipo Piper, Stiff y Stabler con el software “Diagrammes” para poder analizar la química de las aguas presentes. Por último, se crearon mapas estructurales e isopáquicos de las unidades de interés para contribuir al conocimiento del área.

Los resultados reflejan que el agua de la Formación (Fm.) Centenario es de tipo salmuera, de la Fm. Rayoso 71% salobre y 29% salada y del Grupo (Gpo.) Neuquén 68% salobre, 24% dulce y 8% salada. En cuanto a la aptitud para consumo humano el Gpo. Neuquén, La Fm. Rayoso y La Fm. Centenario no son aptas. Para el caso de la aptitud para riego, la Fm. Rayoso y la Fm. Centenario no son aptas, pero, el Gpo. Neuquén se clasifica en un 22% como “utilizable para riego con precauciones”. Además, la Fm. Centenario presenta familias hidroquímicas de tipo cloruradas sódicas y cálcicas. La Fm. Rayoso cloruradas, sulfatadas y bicarbonatadas sódicas con aguas de mezcla de tipo cloruradas-sulfatadas y sulfatadas-cloruradas siempre sódicas. Y, en cuanto al Gpo. Neuquén exhibe familias de tipo cloruradas, sulfatadas y bicarbonatadas sódicas.

En cuanto a la protección de los acuíferos someros la Fm. Candeleros y la Fm. Cerro Lisandro actúan como sello semiregional por sus características litológicas y su posible continuidad en la lateral. El límite mínimo para proteger corresponde hasta el tope de la Fm. Cerro Lisandro de acuerdo con los resultados obtenidos.

Palabras clave: Grupo Neuquén - Formación Rayoso - Formación Centenario - Aptitud - Familia hidroquímica

ABSTRACT

The following study is focused on characterizing the aquifers present in an area of the La Amarga Chica, Bandurria Sur, and Loma Campana blocks within the Neuquén Basin with the purpose of improving management, expanding knowledge, and ensuring their protection. This project was conducted in collaboration with YPF S.A. and the National University of Comahue. YPF S.A. provided information on subsurface geology, well logging, geological controls, and fluid sampling results from specific tests during well drilling (MDT/RCI) or perforation completion stages.

As a working methodology, the water type was classified based on the salinity level associated with each geological unit. Additionally, a classification was made regarding suitability for human consumption and irrigation according to all applicable regulations. Furthermore, electric well profiles were analyzed using the "Petrel" software, generating various transects in different orientations within the study area to establish correlations between geological units and interpret lateral and depth variations. In conjunction with the aforementioned methods, Piper, Stiff, and Stabler-type graphs were generated using the "Diagrammes" software to analyze the chemistry of the present waters. Finally, structural and isopachous maps of the units of interest were created to contribute to the area's understanding.

The results show that water from the Centenario Formation is brine, while 71% of water from the Rayoso Formation is brackish and 29% is saline, and water from the Neuquén Group is 68% brackish, 24% fresh, and 8% saline. In terms of suitability for human consumption, the Neuquén Group, Rayoso Formation, and Centenario Formation are not suitable. Regarding suitability for irrigation, the Rayoso Formation and Centenario Formation are not suitable, but the Neuquén Group is classified as "usable for irrigation with precautions" at 22%. Additionally, the Centenario Formation exhibits hydrochemical families of chloride-sodium and calcium, the Rayoso Formation has chloride-sulfate and bicarbonate-sodium families with water mixtures of chloride-sulfate and sulfate-chloride, always sodium-dominant. As for the Neuquén Group, it displays chloride-sulfate and bicarbonate-sodium families.

Concerning the protection of shallow aquifers, the Candeleros Formation and Cerro Lisandro Formation act as semi-regional seals due to their lithological characteristics and possible lateral continuity. The minimum protection limit corresponds to the top of the Cerro Lisandro Formation based on the obtained results.

Keywords: Neuquén Group - Rayoso Formation - Centenario Formation - Suitability - Hydrochemical family.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Comahue y a todos los docentes que participaron en mi formación.

A mi directora, Lorena Zabala, por aceptar este proyecto, su dedicación y acompañarme en todo el procedimiento.

A mis co-directores, Dufhilo Cecilia, Beatove Mariana y Garcia Luciano, por siempre darme un consejo cuando lo necesitaba y su colaboración para lograr este objetivo.

Al jurado, Curetti Nadia, Asensio Gabriel y Donadio Flavio por aceptar esta propuesta, dedicar su tiempo y contribuir a mejorar este trabajo.

A la empresa YPF por darme la oportunidad de hacer este proyecto y a todos los profesionales que me ayudaron y asistieron con sus conocimientos.

A Mauricio, Alina y Julián mis primeros amigos de la carrera, los cuales voy a llevar en mi corazón siempre.

A todos mis geoamigos/as por los hermosos momentos vividos, su amistad y compañerismo. La universidad es una de las etapas más lindas que viví y sin ellos no hubiese podido.

A mi gran amiga, Mariana, la cual está siempre y me apoya en todo lo que hago.

A todos mis amigos/as de la vida por acompañarme en esta etapa.

A mi novio, Daniel, por ser mi sostén y festejar conmigo cada logro.

Por último, a mi familia, por su apoyo incondicional y por siempre confiar en mí. Sin ustedes esto no podría haber sido posible. Los amo.

A todos/as muchas gracias!

ÍNDICE

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	1
2 ANTECEDENTES	2
3 MARCO TEÓRICO	4
3.1 Ciclo hidrológico	4
3.2 Agua Subterránea	5
3.2.1 Clasificación de las unidades geológicas según su comportamiento hidrogeológico	6
3.2.2 Clasificación de los acuíferos según su comportamiento hidráulico	7
3.3 Hidrogeoquímica	8
3.3.1 Diagrama de Piper	8
3.3.2 Diagrama de Stiff	9
3.3.3 Diagrama de Stabler	10
3.4 Evolución química del agua subterránea regional	10
3.5 Hidrogeoquímica isotópica	11
3.5.1 Isótopos	11
3.5.2 Isotopos estables	11
3.5.3 Fraccionamiento isotópico	11
3.5.4 Exceso de deuterio	13
3.6 Clasificación de pozos	14
3.6.1 Pozo sumidero	14
3.6.2 Pozo monitor	14
3.7 Métodos de muestreo	14
4 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	16
4.1 Ubicación del área de estudio	16
4.2 Provincia geológica - Geomorfología	16
4.3 Clima y precipitaciones	17

4.4	Unidades geológicas de interés	17
4.4.1	Formación Centenario	17
4.4.2	Formación Rayoso	17
4.4.3	Grupo Neuquén	18
5	METODOLOGÍA.....	20
5.1	Correlación.....	20
5.2	Clasificación de salinidad	22
5.3	Clasificación aptitud de aguas	22
5.3.1	Aptitud para consumo humano.....	22
5.3.2	Aptitud para riego.....	24
5.4	Familia hidroquímica	28
5.5	Isotopía.....	29
5.6	Mapas.....	29
6	RESULTADOS	30
6.1	Pases formacionales	30
6.2	Correlación.....	32
6.2.1	Transecta 1.....	33
6.2.2	Transecta 2.....	37
6.2.3	Transecta 3.....	41
6.2.4	Transecta 4.....	45
6.2.5	Transecta 5.....	49
6.2.6	Transecta 6.....	53
6.3	Clasificación de salinidad	56
6.3.1	Formación Centenario	56
6.3.2	Formación Rayoso	57
6.3.3	Grupo Neuquén	57
6.4	Aptitud consumo humano	58
6.4.1	Formación Centenario	58
6.4.2	Formación Rayoso	58
6.4.3	Grupo Neuquén	59
6.5	Aptitud riego	60
6.6	Análisis hidroquímico según unidades geológicas	64
6.6.1	Formación Centenario	64
6.6.2	Formación Rayoso	65

6.6.3	Grupo Neuquén	68
6.7	Mapas isopáquicos	70
6.8	Mapas estructurales.....	72
6.9	Distribución de bicarbonatos, sulfatos y cloruros.....	76
6.10	Isotopía.....	80
7	CONCLUSIONES Y DISCUSIONES	83
8	BIBLIOGRAFIA	85
	ANEXO 1	89
	ANEXO 2	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Modelo hidrogeológico (Meconi, 2018).	3
Figura 2.	Ciclo hidrológico (Chow et al., 1988).....	4
Figura 3.	Clasificación del subsuelo (Modificada de Vélez, 2004).....	5
Figura 4.	a) Sección vertical de una red de flujo suponiendo el subsuelo homogéneo e isotropo. b) Red de flujo con vista tridimensional. "E": zonas que no están sometidas a ningún gradiente (Sánchez San Román, 2012).....	6
Figura 5.	Esquema de acuífero libre y semiconfinado. Si el acuitardo fuera reemplazado por un acuicludo el acuífero semiconfinado pasaría a ser un acuífero confinado (Sánchez San Román, 2014).....	8
Figura 6.	Diagrama de Piper (Custodio y Llamas, 1983).....	9
Figura 7.	Diagramas de Stiff típicos (Modificado de www.aguaysig.com)	10
Figura 8.	Patrón evolutivo del agua subterránea propuesto por Chebotarev 1955 (Sánchez San Román, 2012).....	11
Figura 9.	Relación entre las variaciones naturales de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua oceánica, el vapor atmosférico y la precipitación (Mook, 2002).	13
Figura 10.	Esquema representativo de un pozo.....	15
Figura 11.	Ubicación del área de estudio.	16
Figura 12.	Cuadro de unidades litoestratigráficas del Gpo. Neuquén. A la derecha del mismo se encuentra el esquema litoestratigráfico propuesto por Garrido, 2010.....	19
Figura 13.	Ubicación de los pozos en estudio.	21
Figura 14.	Artículo 982 - (Resolución Conjunta SCS y SAByDR N° 22/2021) del capítulo XII del Código Alimentario.....	23
Figura 15.	Cuadro 5 del Anexo A “Normas de Calidad para el agua” de la ordenanza N° 12.395. Sanción: 1/12/2011. B.O.: 6/1/2012, Agua y Saneamiento.....	24
Figura 16.	Clasificación de los tratamientos de baja o mediana complejidad y alta complejidad según la Autoridad de Aplicación de la Ley 899 del Código de Aguas. ...	24
Figura 17.	Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (U.S. Soil Salinity Laboratory) (Blasco y Rubia 1973).	27
Figura 18.	Gráfico de Riverside utilizado en este trabajo. Modificado de Blasco y Rubia 1973.	28

Figura 19. Encabezado de los perfiles eléctricos, junto con las muestras de fluido, diagramas y litología.	30
Figura 20. Transectas realizadas en el área de estudio.	32
Figura 21. Ubicación de la transecta 1.	33
Figura 22. Transecta 1.	34
Figura 23. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 1.	36
Figura 24. Ubicación de la transecta 2.	37
Figura 25. Transecta 2.	38
Figura 26. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 2.	40
Figura 27. Ubicación de la transecta 3.	41
Figura 28. Transecta 3.	42
Figura 29. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 3.	44
Figura 30. Ubicación de la transecta 4.	45
Figura 31. Transecta 4.	46
Figura 32. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 4.	48
Figura 33. Ubicación de la transecta 5.	49
Figura 34. Transecta 5.	50
Figura 35. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 5.	52
Figura 36. Ubicación de la transecta 6.	53
Figura 37. Transecta 6.	54
Figura 38. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 6.	56
Figura 39. Gráfico de Riverside para las muestras pertenecientes a Gpo. Neuquén y la Fm. Rayoso.	61
Figura 40. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la Fm. Centenario.	64
Figura 41. Diagramas de Stabler para las muestras de agua de la Fm. Centenario.	65
Figura 42. Distribución de las familias de agua de la Fm. Centenario.	65
Figura 43. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la Fm. Rayoso.	66
Figura 44. Diagramas de Stabler para las muestras pertenecientes a la Fm. Rayoso.	67
Figura 45. Distribución de las familias de aguas de la Fm. Rayoso.	67
Figura 46. Diagrama de Piper de las muestras de agua del Gpo. Neuquén.	68
Figura 47. Diagramas de Stabler para las muestras pertenecientes al Gpo. Neuquén.	69
Figura 48. Distribución de las familias de agua en el Gpo. Neuquén.	69
Figura 49. Mapas isopáquicos de las formaciones Centenario, Rayoso, Candeleros, Huincul inferior, Huincul superior y Cerro Lisandro.	71
Figura 50. Mapa estructural al tope de la Fm. Rayoso.	73
Figura 51. Mapa estructural al tope del miembro superior de la Fm. Centenario.	73
Figura 52. Mapa estructural al tope del miembro inferior de la Fm. Centenario.	73
Figura 53. Mapa estructural al tope de la Fm. Candeleros.	74
Figura 54. Mapa estructural al tope del miembro superior de la Fm. Huincul.	74
Figura 55. Mapa estructural al tope del miembro inferior de la Fm. Huincul.	74
Figura 56. Mapa estructural al tope de la Fm. Cerro Lisandro.	75
Figura 57. Distribución de los bicarbonatos presentes en la Fm. Centenario.	77
Figura 58. Distribución de los bicarbonatos presentes en la Fm. Rayoso.	77
Figura 59. Distribución de los bicarbonatos presentes en el Gpo. Neuquén.	77
Figura 60. Distribución de los sulfatos presentes en la Fm. Centenario.	78
Figura 61. Distribución de los sulfatos presentes en el Gpo. Neuquén.	78

Figura 62. Distribución de los sulfatos presentes en la Fm. Rayoso.	78
Figura 63. Distribución de los cloruros presentes en la Fm. Centenario.....	79
Figura 64. Distribución de los cloruros presentes en la Fm. Rayoso.	79
Figura 65. Distribución de los cloruros presentes en el Gpo. Neuquén	79
Figura 66. Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ para las muestras en estudio.	81
Figura 67. Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs CE para las muestras en estudio.	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del tipo de agua (Davis y De Wiest, 1967).....	22
Tabla 2. Criterios de peligro de salinización y restricciones de uso de las aguas empleadas para riego según el Laboratorio de Salinidad de Riverside.	25
Tabla 3. Clasificación del peligro de sodificación según el Laboratorio de Salinidad de Riverside.....	25
Tabla 4. Niveles guía de calidad de agua para irrigación según el Decreto 831/93 de la Ley N° 24.051 “Residuos Peligrosos”.....	26
Tabla 5. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 1.	35
Tabla 6. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 2.	39
Tabla 7. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 3.	43
Tabla 8. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 4.	47
Tabla 9. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 5.	51
Tabla 10. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 6.	55
Tabla 11. Clasificación del tipo de agua de las muestras de la Fm. Centenario.....	57
Tabla 12. Clasificación del tipo de agua de las muestras de la Fm. Rayoso.	57
Tabla 13. Clasificación del tipo de agua de las muestras del Gpo. Neuquén.....	57
Tabla 14. Clasificación de aptitud para consumo humano de las muestras pertenecientes a la Fm. Centenario.....	58
Tabla 15. Clasificación de aptitud para consumo humano de las muestras pertenecientes a la Fm. Rayoso.	59
Tabla 16. Clasificación de aptitud para consumo humano de las muestras pertenecientes al Gpo. Neuquén.	60
Tabla 17. Aptitud para riego de las muestras de agua de la Fm. Centenario.	62
Tabla 18. Aptitud para riego de las muestras de agua de la Fm. Rayoso.	63
Tabla 19. Aptitud para riego de las muestras de agua del Gpo. Neuquén.....	63
Tabla 20. Resultados isotópicos brindados por el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS).....	80

1 INTRODUCCIÓN

El agua es la sustancia más abundante en la Tierra y se calcula que alrededor del 96,5% se encuentra en los océanos, el 1,7% en los hielos polares, el 1,7% en aguas subterráneas y el 0,1% en los sistemas de agua superficial y atmosférica. De la totalidad del agua subterránea el 0,76% corresponde a agua dulce y el 0,93% a agua salada (Chow *et al.* 1988). Además, el agua subterránea, representa una fase muy importante del ciclo hidrológico ya que parte del flujo en corrientes permanentes de agua proviene del agua subterránea (Zektser y Loaiciga, 1193).

En muchas regiones del mundo, especialmente en climas áridos y semiáridos, los acuíferos constituyen la principal o única fuente de suministro de agua, por lo tanto, su evaluación es de fundamental importancia para determinar la posibilidad de desarrollo económico-social de estas regiones (Carrica, 2005). Aproximadamente el 60% del territorio de la provincia del Neuquén, se encuentra bajo la influencia del clima árido y semiárido, caracterizado por tener una relación de precipitación media anual y evapotranspiración potencial inferior a 0,65 (UNEP, 1997), lo que se traduce en un marcado déficit hídrico (Gatica, 2017).

Colombino y Luengo en 2011 dividieron la provincia del Neuquén en siete regiones hidrogeológicas. Nuestra área de estudio se ubicaría en la región noreste, la cual la describen como una zona que se puede dividir en dos: al norte del volcán Auca Mahuida presentándose como la zona de recarga y al sur constituyendo el reservorio.

En la provincia del Neuquén, con el creciente desarrollo de yacimientos no convencionales, la Autoridad de Aplicación de la Ley 899 del Código de Aguas solicita el estudio y la caracterización de los reservorios someros correspondientes a Gpo. Neuquén, Fm. Rayoso y Fm. Centenario con el fin de darle un uso adecuado a cada uno de ellos según su calidad de agua.

1.1 Objetivo general

Caracterizar la hidrogeoquímica de los acuíferos presentes en un área de los bloques La Amarga Chica, Bandurria Sur y Loma Campana con el propósito de mejorar la gestión y protección de los mismos.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la hidrogeología e hidroquímica del área en estudio. El análisis hidrogeológico se reemplazó por el análisis isotópico para así poder reforzar las conclusiones hidroquímicas.
- Determinar la calidad del agua para los distintos usos según la normativa vigente.
- Mapear las zonas de interés para la conservación de acuíferos.

2 ANTECEDENTES

En los últimos años se han publicado trabajos hidrogeológicos que conceptualizan y describen los sistemas acuíferos y modelos hidrogeológicos. Algunos autores que los desarrollan son: Meconi (2015), Alonso *et al.* (2016), Gatica (2017), Meconi (2018) y Del Prete (2019).

Meconi (2015, 2016) propone la sistematización y denominación Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso (SANeRa) en el área del Dorso de Los Chihuidos, Sierra Auca Mahuida, Bajo de Añelo y Gpo. Neuquén.

Alonso *et al.* (2016) definieron que, dentro de las rocas sedimentarias de la Cuenca Neuquina, la Fm. Rayoso y la sección inferior del Gpo. Neuquén, presentan los niveles estratigráficos con mayor potencial hidrogeológico en el sector centro norte de la provincia del Neuquén. En base a la interpretación de los registros eléctricos de pozo, en la región del Dorso de los Chihuidos las principales unidades acuíferas se desarrollan en la Fm. Rayoso entre los 200 y 500 mbbp. Si bien esta formación tiene buena continuidad hacia el este, en el Bajo de Añelo, disminuye su importancia relativa como portadora de agua, debido a que el Gpo. Neuquén contiene mayor cantidad de intervalos potencialmente acuíferos a una profundidad de hasta 500 mbbp. Además de este estudio hidrogeológico Bertoni y Dufilho (2016) realizaron una caracterización hidrogeoquímica de dichos acuíferos.

Gatica (2017) determinó que unos 3.900 hm³ anuales se recargarían en promedio en la región extra-andina. Debido a esta recarga, unos 842 hm³ estarían disponibles anualmente para ser captados en los acuíferos del Gpo. Neuquén y Fm. Rayoso.

Meconi (2018) en base a los análisis de laboratorio de 3 muestras de agua concluye que el SANeRa presenta agua de baja salinidad relativa pero salobre pues supera los 1.500 mg/L de Sólidos Totales Disueltos (STD) y por lo tanto no es apta para “abastecimiento de poblaciones”, y dependiendo de sus características iónicas, podría no ser apta para “irrigación”. En otros sitios el agua del SANeRa tiene menor y mayor salinidad. Todo esto resalta que debe evaluarse concretamente en cada caso si entra o no en la restricción del decreto mencionado, no siendo válido generalizar sin datos concretos. A su vez, determinó que su área de estudio (13.000 km²) está parcialmente asociada con el ciclo hidrológico superficial a través de dos áreas de recarga in situ principales: la Sierra de Auca Mahuida y el Dorso de los Chihuidos, y un área de descarga principal con surgencia: el Bajo de Añelo. También posee recarga por aporte de agua alóctona (del deshielo de los Andes) de los ríos Neuquén y Colorado (Figura 1).

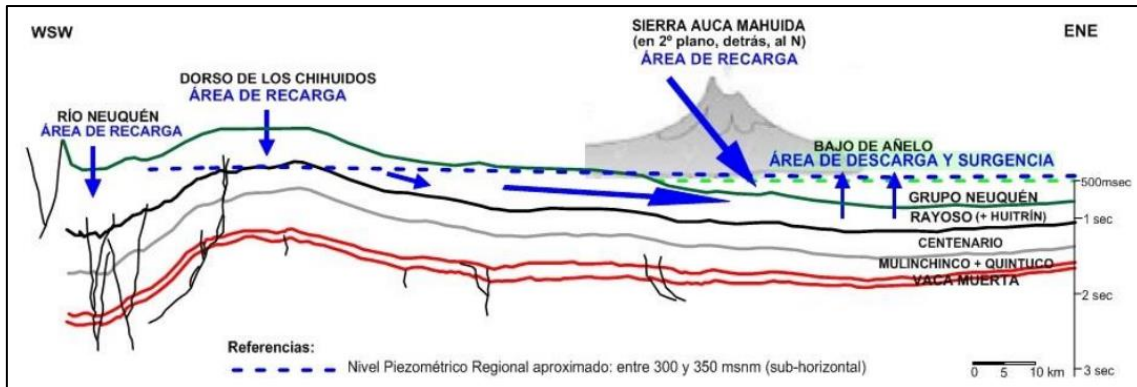


Figura 1. Modelo hidrogeológico (Meconi, 2018).

Del Prete (2019) realizó un estudio en el Dorso los Chihuidos y concluyó que tanto la Fm. Rayoso como el Gpo. Neuquén alojan múltiples acuíferos confinados de calidad variable, siendo la dirección regional de flujo subterráneo predominantemente de oeste a este. Además, definió que el agua subterránea evoluciona geoquímicamente en dirección del flujo regional O-E. De este modo, tanto las aguas subterráneas tomadas de vertientes como las de perforaciones de la Fm. Candeleros a una cota mayor a 1.000 msnm, son aguas dulces (CE promedio de 1.288 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y de tipo geoquímico sulfatadas sódicas y sulfatadas mixtas, mientras que las perforaciones muestreadas a menores altitudes (menos de 600 msnm) y que captan tanto de la Fm. Candeleros como de la Fm. Rayoso tienen agua con mayor contenido salino (CE en el orden de los 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y de tipo bicarbonatadas mixtas, cloruradas mixtas y sulfatadas mixtas, siempre sódicas.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Ciclo hidrológico

Denominamos ciclo hidrológico al movimiento general del agua. Es ascendente por evaporación y descendente, primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea (Sánchez Román, 2014).

El ciclo no tiene principio ni fin en donde sus diversos procesos ocurren de forma continua. El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre convirtiéndose en parte de la atmósfera, el vapor de agua se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y genera precipitaciones sobre la superficie terrestre o los océanos. El agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresan a la atmósfera mediante evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo continúa (Chow *et al.* 1988) (Figura 2).

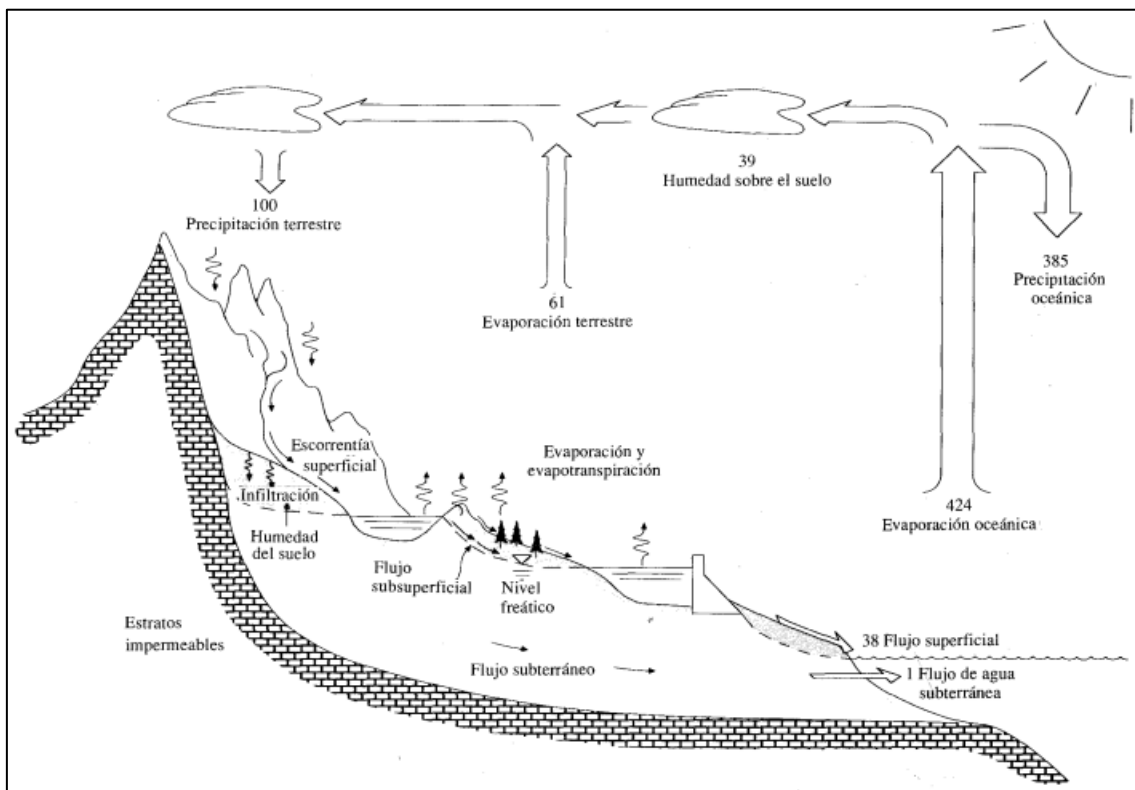


Figura 2. Ciclo hidrológico (Chow *et al.*, 1988).

3.2 Agua Subterránea

El agua subterránea corresponde a una parte del ciclo hidrogeológico y es el resultado de la infiltración profunda a través de los poros o grietas de las rocas. En el subsuelo existen dos zonas, la zona saturada, que corresponde a la parte que se encuentra por debajo de la superficie freática con todos sus poros llenos de agua, y, la zona no saturada o vadosa (coexisten las fases agua, aire y vapor) que se encuentra limitada por debajo por la superficie freática y por encima por la superficie del terreno. Esta última, a su vez, se divide en tres subzonas, la subzona sometida a evapotranspiración que corresponde a la zona más superficial la cual puede tener un espesor muy pequeño (entre 8 y 25 cm) y puede presentar vegetación, la subzona intermedia que se encuentra situada por debajo de la subzona mencionada anteriormente y la subzona capilar que presenta su base saturada siendo esta la transición entre la zona no saturada y saturada (Figura 3 Figura 3. Clasificación del subsuelo (Modificada de Vélez, 2004).) (Custodio y Llamas, 1983).

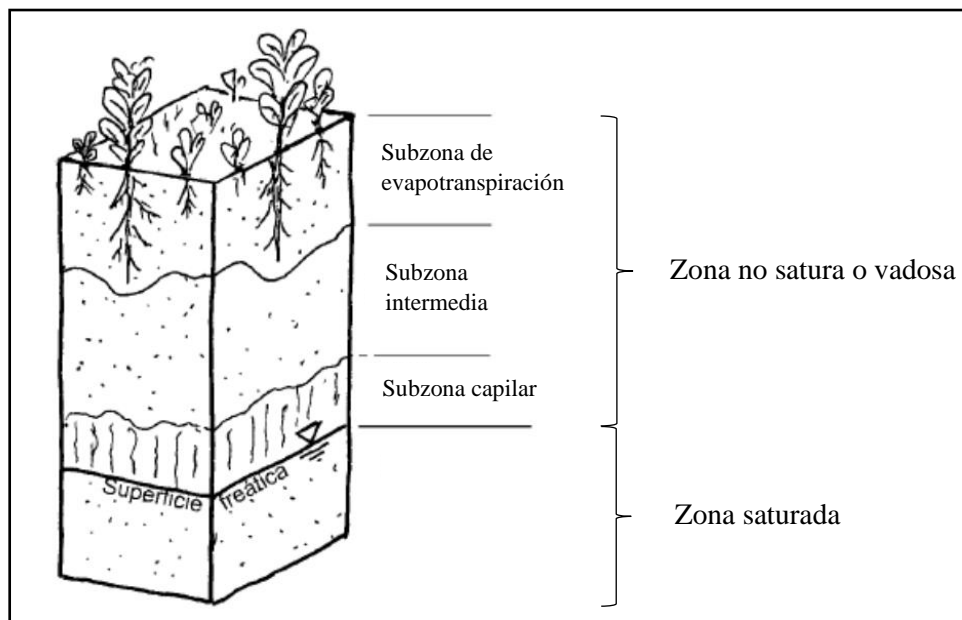


Figura 3. Clasificación del subsuelo (Modificada de Vélez, 2004).

En general, llamamos superficie freática a la superficie formada por los puntos con una presión igual a la presión atmosférica y que por lo general presenta una forma similar a la topografía (Sánchez San Román, 2012).

La recarga natural es el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un periodo de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua (Custodio y Llamas, 1983).

El flujo natural del agua subterránea en una región se esquematiza mediante redes de flujo y se pueden identificar diferentes áreas. Por un lado, están las áreas de recarga en donde el flujo subterráneo presenta una componente vertical descendente, y las áreas de descarga, ascendente. También existen zonas intermedias en las que el flujo es prácticamente horizontal. A su vez, tenemos flujos locales y regionales, su diferencia solo

radica en la escala que consideremos. Los flujos locales normalmente se asocian a valles de menor entidad y los regionales a valles de una región (Figura 4) (Sánchez San Román, 2012).

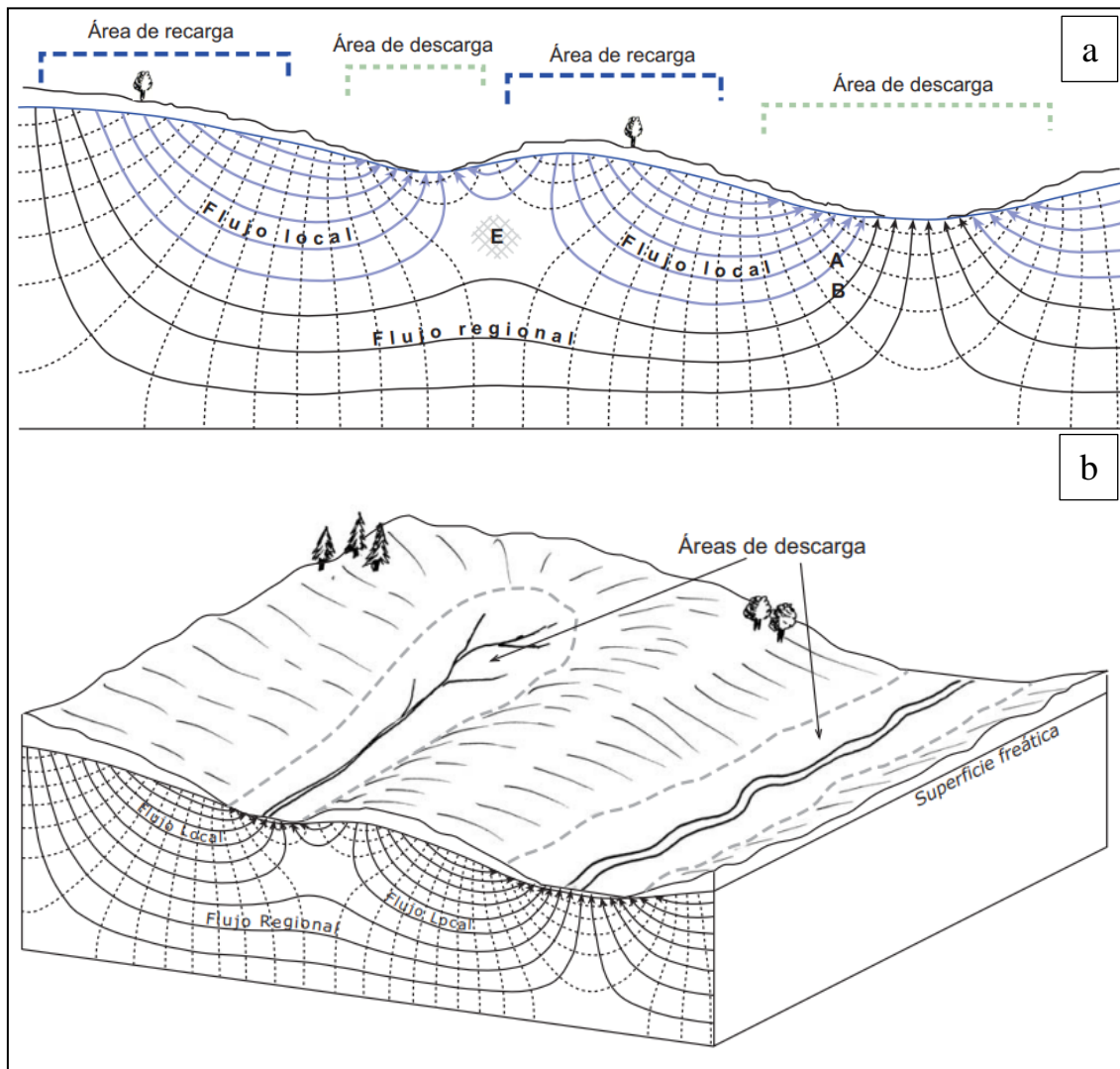


Figura 4. a) Sección vertical de una red de flujo suponiendo el subsuelo homogéneo e isotrópico. b) Red de flujo con vista tridimensional. "E": zonas que no están sometidas a ningún gradiente (Sánchez San Román, 2012).

3.2.1 Clasificación de las unidades geológicas según su comportamiento hidrogeológico

En función de la capacidad de recibir, almacenar y transmitir el agua, las distintas formaciones geológicas se pueden clasificar como:

- Acuífero: formación geológica que, permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades. Ejemplo: arenas, gravas, granitos que presenten alguna fracturación importante (Custodio, 1998).

- **Acuícludo:** formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero que no permite que circule a través de ella. Ejemplo: limos, arcillas (Sánchez San Román, 2014).
- **Acuitardo:** formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero que la misma circula a través de ella con dificultad. Ejemplo: arenas arcillosas, areniscas, rocas que presenten alteraciones y/o fracturaciones (Sánchez San Román, 2014).
- **Acuífugo:** formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella. Ejemplo: granitos o esquistos inalterados y no fracturados (Sánchez San Román, 2014).

3.2.2 *Clasificación de los acuíferos según su comportamiento hidráulico*

Los acuíferos a su vez se pueden clasificar en:

- **Acuíferos libres:** aquellos que su límite superior (superficie freática) está a presión atmosférica y el agua satura los espacios porosos. Si se perfora un sondeo y la perforación alcanza la superficie freática el nivel del agua en la perforación permanece en el mismo nivel en que se cortó. En este tipo de acuíferos se pueden llegar a generar lagunas o humedales si la superficie freática corta la topografía (Sánchez San Román, 2014). Su recarga puede ser producto de la infiltración o a través de flujos laterales (Figura 5).
- **Acuíferos confinados:** se encuentran entre dos capas impermeables (acuicludos). La extracción procede de la descompresión del agua y en menor medida de la compresión de la matriz sólida. Si una perforación alcanza el techo de un acuífero confinado, el nivel del agua dentro de la perforación subiría hasta alcanzar la superficie piezométrica (superficie que alcanzaría el agua si se hicieran diversas perforaciones) (Sánchez San Román, 2014).
- **Acuíferos semiconfinados:** acuíferos a presión pero que alguna de las capas confinantes es semipermeable, acuitardo, y a través de ella le llegan filtraciones (Sánchez San Román, 2014) (Figura 5).

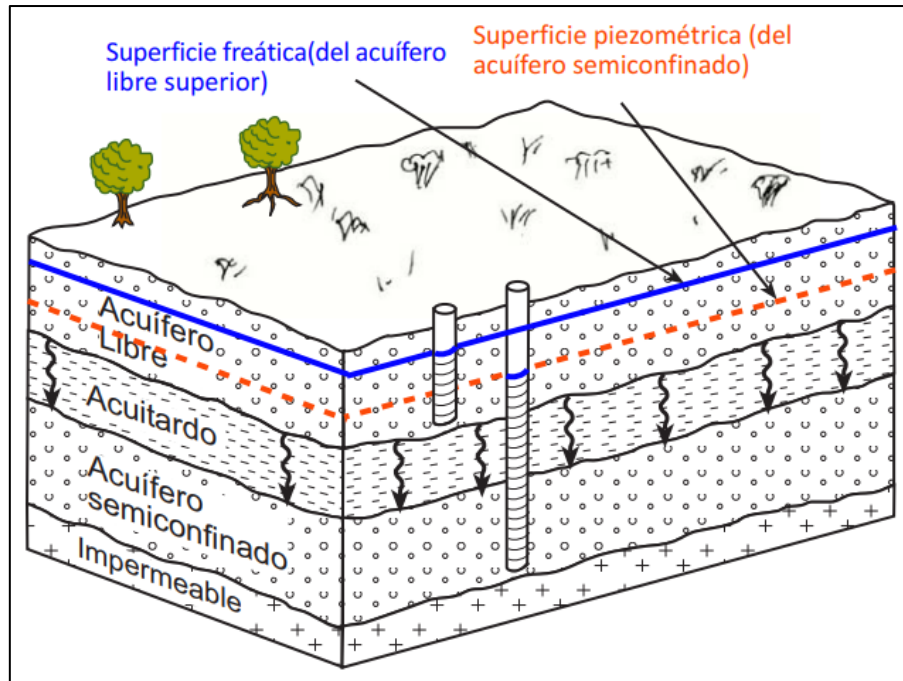


Figura 5. Esquema de acuífero libre y semiconfinado. Si el acuitardo fuera reemplazado por un acuícludo el acuífero semiconfinado pasaría a ser un acuífero confinado (Sánchez San Román, 2014).

3.3 Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica se encarga de estudiar las propiedades químicas del agua superficial y subterránea, en conjunto con la geología. Analiza los iones disueltos y los procesos de interacción agua-sólido, centrándose en el estudio de los patrones del líquido y su relación con las rocas de la corteza terrestre.

La calidad química del agua subterránea está determinada por el tipo y cantidad de sustancias disueltas en la misma. El conocimiento de la composición química y su distribución espacial es importante, tanto desde el punto de vista de la idoneidad para el consumo humano e irrigación, como por la información que pueden aportar acerca de la dirección y extensión de los sistemas de flujo subterráneo.

Gracias al empleo de diferentes gráficos y diagramas, puede representarse de una forma muy simple comparaciones entre análisis de aguas de distintos lugares o de un mismo lugar, pero en diferentes momentos. Estos gráficos pueden representar variaciones temporales, variaciones espaciales o bien resaltar relaciones entre los iones de una misma muestra.

Existen numerosos diagramas que pueden utilizarse, específicamente en este estudio se trabajó con el diagrama de Piper, el diagrama de Stiff y el diagrama de Stabler.

3.3.1 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper es utilizado como un gráfico efectivo para la representación de muestras de agua en estudios hidrogeológicos. Las concentraciones de los iones

mayoritarios se representan en porcentajes de concentración en meq/L. Este diagrama consta de dos triángulos equiláteros en la parte inferior y un rombo en la parte superior el cual combina y relaciona los datos de los triángulos inferiores. En el triángulo inferior izquierdo, se muestran las concentraciones de cationes, mientras que en el triángulo inferior derecho se muestran las concentraciones de los aniones; cada vértice de cada triángulo corresponde al 100% de cada ion. Se nombra el agua por el anión o el catión que sobrepasa al 50% de sus sumas respectivas; si ninguno supera al 50% se nombran los dos más abundantes (Figura 6) (Custodio y Llamas 1983). Este diagrama es de gran utilidad ya que se puede visualizar la evolución geoquímica de las aguas subterráneas, detectar procesos como intercambio catiónico, visualizar mezclas entre dos tipos de agua y observar procesos de dilución o precipitación de especies iónicas.

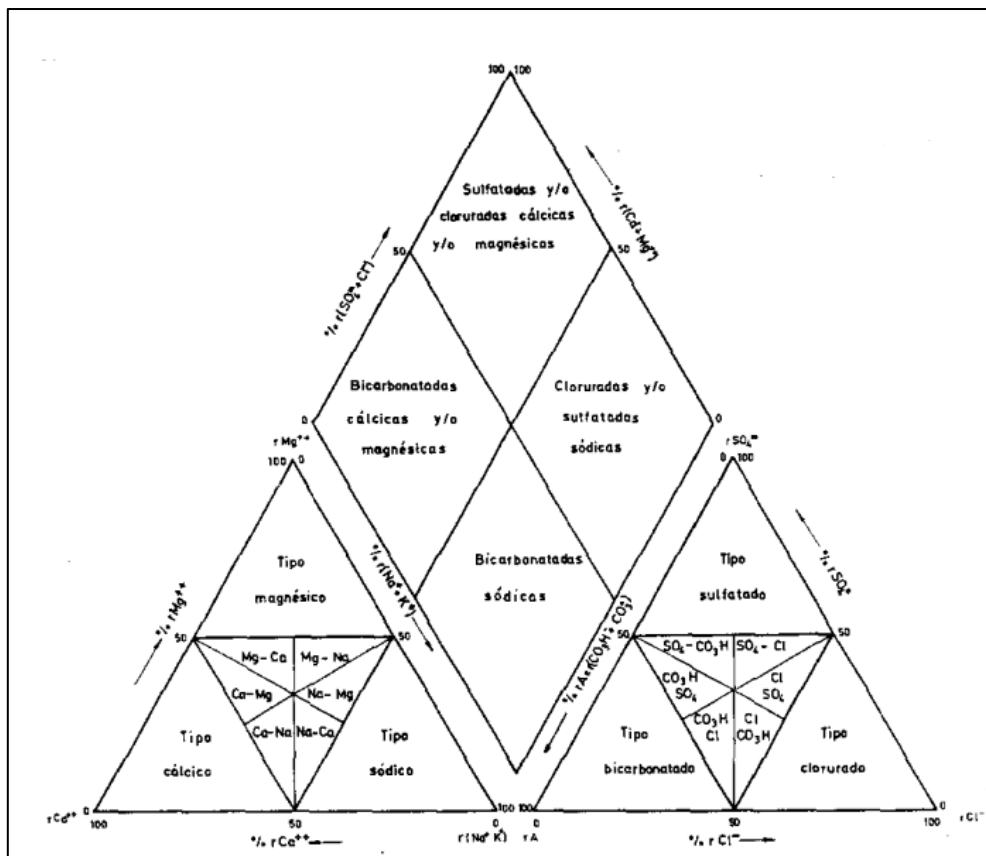


Figura 6. Diagrama de Piper (Custodio y Llamas, 1983).

3.3.2 Diagrama de Stiff

Los diagramas de Stiff son aplicados comúnmente para representar la química de las aguas subterráneas. En un diagrama de Stiff las concentraciones de los componentes principales se representan en meq/L. Está compuesto por dos perfiles enfrentados y unidos por rectas horizontales; a la izquierda se encuentra el perfil de los cationes y a la derecha el perfil de los aniones. Dependiendo del tipo de figura que se genere en base a las concentraciones determinadas de los aniones y cationes, se puede inferir el tiempo del agua asociado a las zonas de recarga. Para identificarlas de una manera rápida existen tres formas típicas que se denominan: “punta flecha” (aguas jóvenes), “T” (aguas

antiguas/evolucionadas) y “del visto bueno” (aguas de conducción). También es útil para observar tendencias evolutivas de iones en profundidad, y si son plasmados en un mapa, visualizar rápidamente la variación espacial de la mineralización (mientras más ancha la figura más mineralización) (Figura 7).

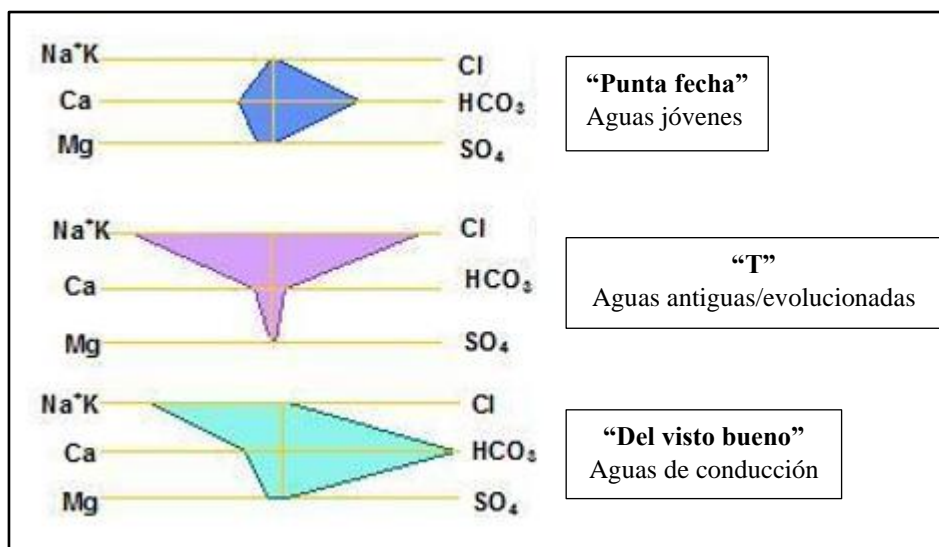


Figura 7. Diagramas de Stiff típicos (Modificado de www.aguaysig.com)

3.3.3 Diagrama de Stabler

El diagrama de Stabler o Barra Rígida presenta la característica de que puede representarse de forma horizontal o vertical. En el mismo se puede observar a simple vista la proporción de cada determinación.

3.4 Evolución química del agua subterránea regional

Las aguas de circulación regional tienden a ir aumentando su mineralización hasta irse saturando en los diferentes iones (Custodio y Llamas, 1983). Desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima hasta que sale al exterior pueden transcurrir unos días o miles de años y el recorrido pueden ser unos metros o varios kilómetros. Por lo tanto, la evolución química del agua dependerá de los minerales con los que el agua entre en contacto y del tiempo de contacto, que, a su vez, depende de la velocidad del flujo (Sánchez San Román, 2012).

Chebotarev (1955) presentó un patrón evolutivo del agua subterránea en donde como norma general, a mayor tiempo de permanencia en el terreno, mayor será la salinidad del agua. Por lo tanto, se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas, después predomina el sulfato, y, por último, las aguas más salinas, cloruradas (Figura 8).

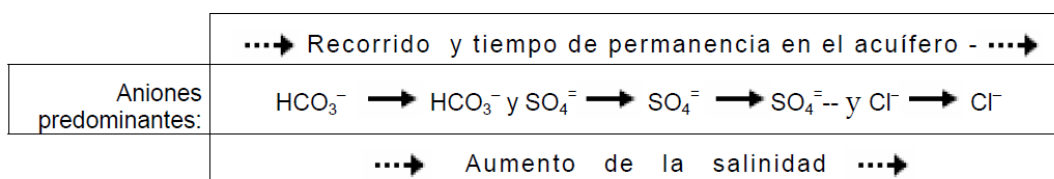


Figura 8. Patrón evolutivo del agua subterránea propuesto por Chebotarev 1955 (Sánchez San Román, 2012).

Esta secuencia se debe a dos causas: la solubilidad y la abundancia en el subsuelo de las distintas sales. La solubilidad de los carbonatos es mucho más baja que la de los sulfatos, que, a su vez, son menos solubles que los cloruros. Por lo tanto, primero se alcanza el tope para los bicarbonatos, después (raramente) para los sulfatos y finalmente (casi nunca) para los cloruros. El segundo factor, la abundancia, hace referencia a la probabilidad que existe de que un agua encuentre minerales que le aporten bicarbonatos, sulfatos o cloruros. En la realidad, la disponibilidad de las distintas sales es que siempre existe un aporte de bicarbonatos (el CO_2 del suelo, cuando no existan sales carbonatadas, normalmente calcita), en segundo lugar, los yesos (sulfato cálcico) son muy frecuentes en series sedimentarias y finalmente, las sales cloruradas que son las menos abundantes.

3.5 Hidrogeoquímica isotópica

Un elemento clave para el manejo del recurso agua es el empleo de trazadores isotópicos naturales. La variación en la composición isotópica puede reflejar sin dudas los procesos operantes de mezcla entre diferentes componentes, evaporación, disolución de sales e indicar el origen de las zonas de recarga.

3.5.1 Isótopos

Átomos de un mismo elemento cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones, por lo tanto, diferente masa.

3.5.2 Isótopos estables

La molécula de agua está formada por dos elementos: hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno se presenta en la naturaleza bajo la forma de dos isótopos estables, el protio (^1H) y el deuterio (^2H o D), y uno radiactivo, el tritio (^3H o T). El oxígeno posee tres isótopos estables: ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O .

3.5.3 Fraccionamiento isotópico

La sustitución de isótopos, tanto de oxígeno como de hidrógeno, en la molécula de agua produce variaciones en aquellas propiedades controladas directamente por la masa molecular, como la densidad, presión de vapor, velocidad de difusión, etc. Estas variaciones dan lugar al llamado “fraccionamiento isotópico” que consiste en la reacomodación de las especies isotópicas entre las distintas sustancias o fases intervinientes, de forma que las concentraciones de estas resultan ser diferentes a las del

estado inicial. Este fraccionamiento se relaciona con la temperatura del aire, que, a su vez, es en función de la latitud y altitud.

Los procesos que llevan al fraccionamiento isotópico natural del hidrógeno y del oxígeno del agua, se producen fundamentalmente en la evaporación y condensación, aunque también pueden colaborar en menor intensidad otros fenómenos de tipo de difusión térmica, biológicos, etc. (Custodio y Llamas, 1983).

La relación $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$ se estudia mediante un gráfico en el que se representan los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en función de los correspondientes a $\delta^2\text{H}$ (Figura 9). Este análisis se basa en que durante la evaporación en condiciones de equilibrio la relación es $\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O}$ (circulo negro de la figura) ya que como el H tiene mayor diferencia de masa molecular, es el que más se fracciona (se fracciona 8 veces lo que se fracciona el O) y, además, se difunde más que el O. Por otro lado, como las precipitaciones ocurren en condiciones de no equilibrio, se genera un exceso de deuterio (+10), de modo que los puntos representativos quedan sobre una línea cuya expresión para el agua de lluvia es $\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$, estando δ en ‰ VSMOW. Ésta se denomina Línea Meteorica Mundial (LMM) o Global Meteoric Water Line (GMWL) en sus siglas en inglés (Clark, 2015).

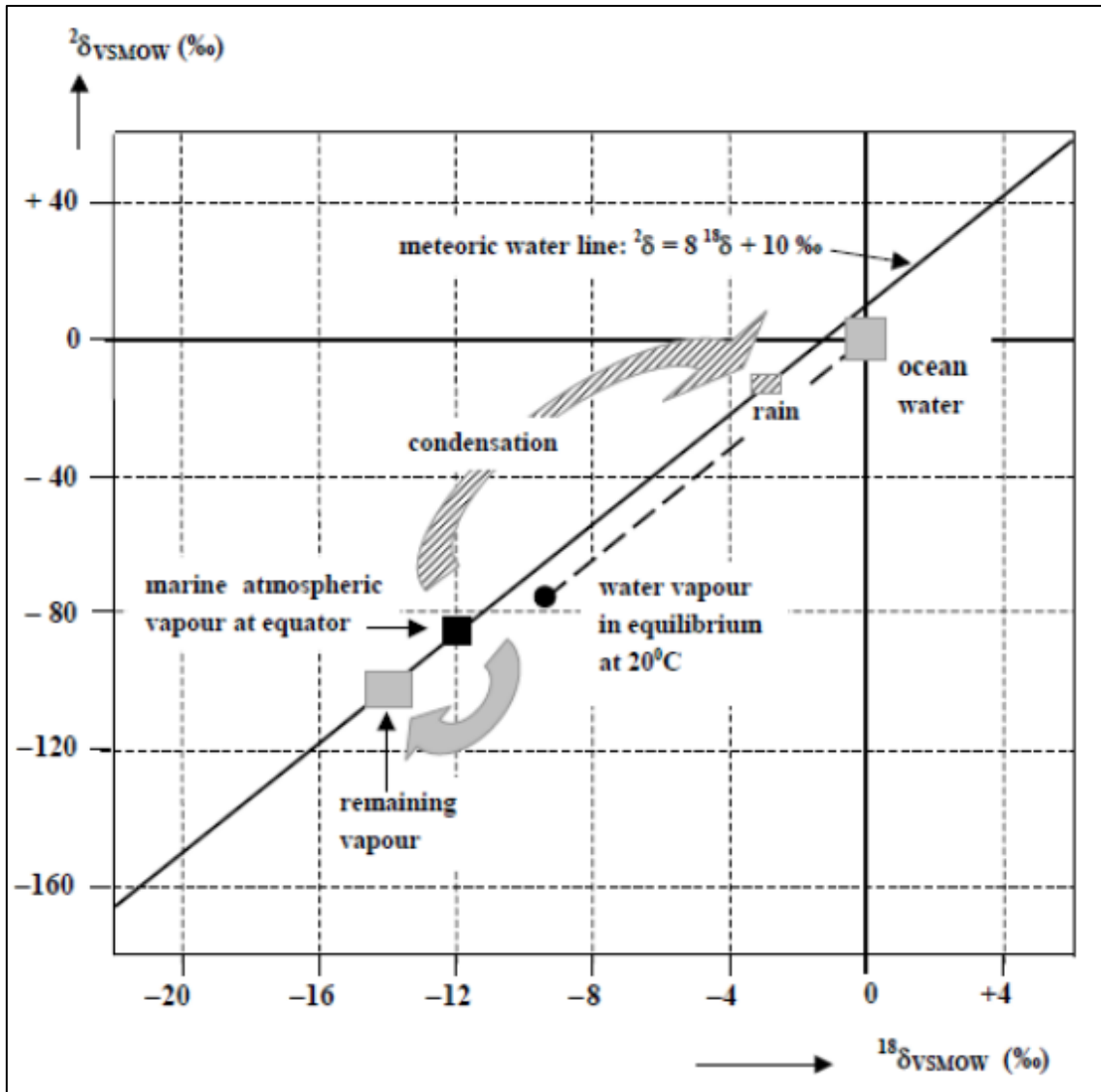


Figura 9. Relación entre las variaciones naturales de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua oceánica, el vapor atmosférico y la precipitación (Mook, 2002).

3.5.4 Exceso de deuterio

El exceso de deuterio (d) es un parámetro importante para determinar el origen de las precipitaciones y, a su vez, diferenciar procesos que se desarrollaron en equilibrio isotópico de aquellos que no lo hicieron (Dapeña y Panarello, 2008b).

El mismo se calcula con la siguiente fórmula: $d = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O}$

En la mayoría de las precipitaciones continentales $d = 10\text{‰}$. Un valor alto de “d” está asociado con bajos contenidos de humedad, mientras que un valor bajo está asociado con altos contenidos de humedad. Un valor negativo de “d”, si bien es raro que ocurra, puede indicar que no hay equilibrio y por lo tanto el fraccionamiento es cinético (Clark, 2015).

3.6 Clasificación de pozos

3.6.1 *Pozo sumidero*

Un pozo sumidero tiene como objetivo la disposición final del agua de producción, flowback, agua de lavado de hidrocarburo y cualquier otro fluido considerado de residuo en capas confinadas y estables que, en el sector de estudio, corresponden a la Fm. Centenario.

3.6.2 *Pozo monitor*

Con la finalidad de monitorear la preservación de los acuíferos, la Autoridad de Aplicación de la Ley 899 del Código de Aguas tiene como requerimiento que, por cada pozo sumidero perforado, exista un pozo monitor hasta la formación inmediata superior al nivel disposal, en este caso es la base de la Fm. Rayoso. Los mismos actúan como “alarma temprana” en caso de pérdida de integridad del sello litológico.

3.7 Métodos de muestreo

En la industria petrolera se pueden obtener muestras de fluido de formación en diferentes etapas de la vida útil de un pozo. En este informe se trabajó con muestras tomadas en dos fases diferentes, durante la perforación del pozo y en la etapa de terminación de este. En la primera, el muestreo se realiza a pozo abierto y las herramientas que se utilizan con frecuencia son dos: Modular Formation Dynamics Testes (MDT) y Reservoir Characterization Instrument (RCI). La diferencia de estas radica en que cada herramienta corresponde a una compañía de servicio diferente, pero el accionar de ambas se basa en los mismos principios. A su vez, dichas herramientas miden puntos de presión que sirven para visualizar la movilidad de las capas y así poder identificar las zonas de interés para el muestreo.

El funcionamiento de estas herramientas consiste primero en posicionarse en la zona donde se quiere muestrear. Luego, se aísla la zona de interés mediante “patines” o “packers” desvinculando la columna de fluido respecto a dicha zona. Una vez aislada, se sitúa la herramienta en la pared del pozo y mediante la acción de un pequeño pistón se extrae el fluido. Para poder corroborar que el fluido extraído corresponde a agua de formación se deben estabilizar los sensores de temperatura, óptico, resistivo e índice de refracción (dependiendo de la herramienta utilizada). Una vez corroborado esto, el fluido extraído se deriva a los dos módulos que funcionan como recipientes. En el caso de MDT, generalmente, cada módulo abarca un volumen de 1 gal cada uno y en el caso de RCI 4,2 L cada módulo.

En la etapa de terminación del pozo el muestreo se realiza mediante pistoneo con el pozo entubado y a diferencia de los muestreos en la etapa de perforación este no es puntual, sino que abarca un intervalo/zona. Una vez entubado el pozo se baja una herramienta de punzado compuesta por cañones, y mediante su detonación se genera una

vinculación entre la formación y el pozo (previa destrucción del casing y el cemento). Estas zonas punzadas son previamente definidas en base a la integración de perfiles del pozo y control geológico. Posteriormente, se arma en superficie la herramienta de pistoneo la cual consiste en un conjunto de tapón y packer que sirven para aislar las zonas punzadas del resto de la columna (Figura 10). Se baja la herramienta y mediante el accionar de un pistón se comienza con la extracción del fluido dirigiéndose directamente a la superficie. Una vez que el fluido llega a superficie se miden los parámetros de estabilización (pH, salinidad, densidad, conductividad) y si durante varias mediciones consecutivas no presentan variaciones significativas, se considera que los parámetros se encuentran estabilizados y que el fluido extraído es representativo de la formación de interés.

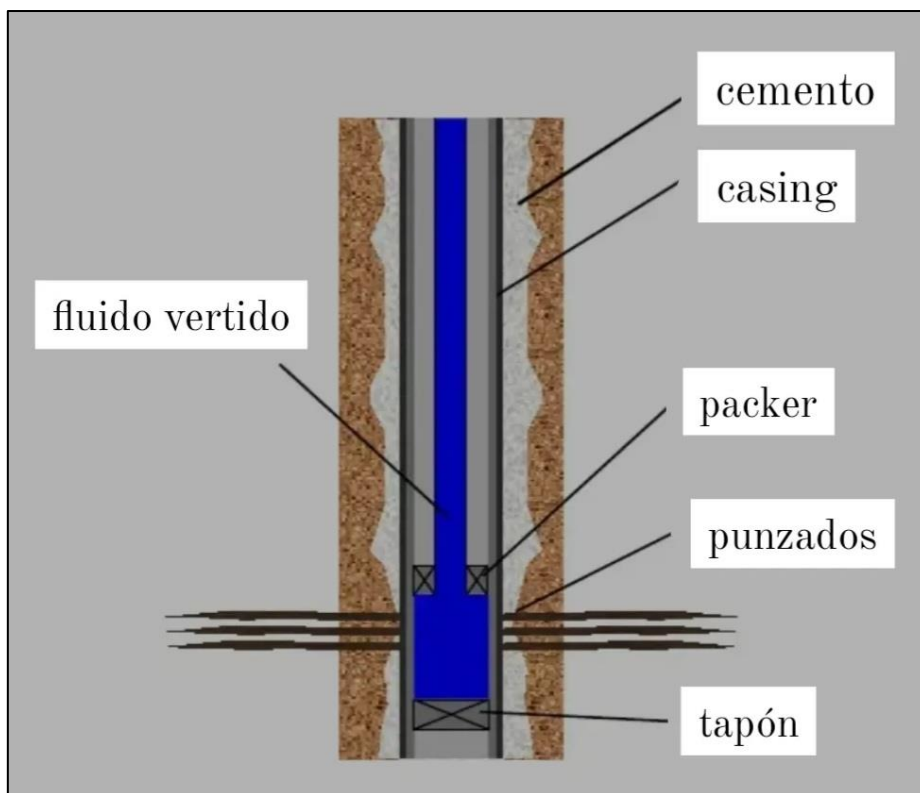


Figura 10. Esquema representativo de un pozo.

4 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia del Neuquén, más específicamente en un área de los bloques La Amarga Chica, Bandurria Sur y Loma Campana, abarcando una superficie de 361 km² (Figura 11).

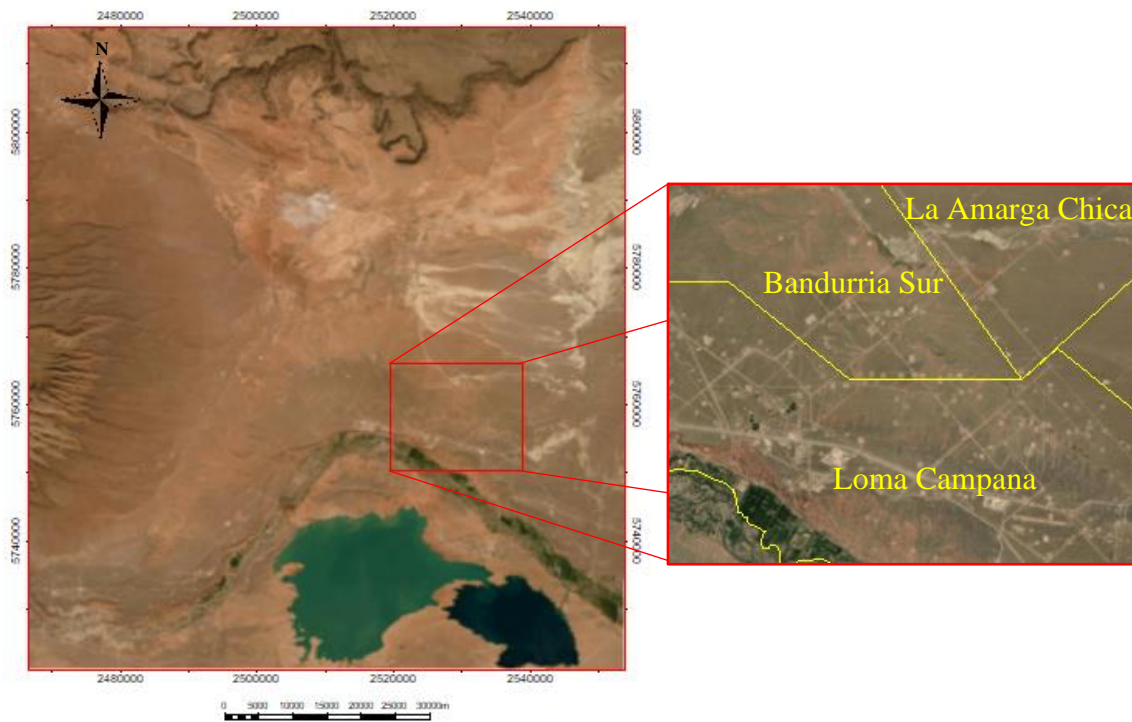


Figura 11. Ubicación del área de estudio.

4.2 Provincia geológica - Geomorfología

Llamamos provincia geológica a una región caracterizada por una determinada sucesión estratigráfica, un estilo estructural propio y rasgos geomorfológicos peculiares, siendo el conjunto expresión de una particular historia geológica (Rolleri, 1976).

Sobre las distintas propuestas de diferentes autores se han reconocido en la provincia del Neuquén tres grandes provincias geológicas: la Cordillera Principal, la Cordillera Patagónica y el Engolfamiento Neuquino.

El Engolfamiento Neuquino comprende la región extrandina del Neuquén. Su límite occidental está dado por la Cordillera Principal. Su límite nororiental por el borde de la Cuenca Neuquina en su contacto con el basamento del Bloque de San Rafael y su proyección hacia el sur. Su límite suroriental coincide nuevamente con el de la Cuenca Neuquina. Este engolfamiento presenta un rasgo de primer orden que segmenta la cuenca en dos subcuencas, conocido como Dorsal de Huincul, y que correspondería al antiguo límite del continente paleozoico de Patagonia (Bettini, 1984; Ramos *et al.*, 2004). Hacia el norte de dicha dorsal se encuentra la subcuenca principal y hacia el sur la subcuenca

de Picún Leufú (Ramos *et al.*, 2011). El área de estudio de este trabajo se sitúa en el Engolfamiento Neuquino en la subcuenca principal al norte de la Dorsal de Huincul.

4.3 Clima y precipitaciones

La provincia del Neuquén presenta condiciones húmedas en la zona andina, y áridas hacia el este en la zona extrandina. Aproximadamente el 60% del territorio de la provincia del Neuquén, se encuentra bajo la influencia del clima árido y semiárido, caracterizado por tener una relación de precipitación media anual y evapotranspiración potencial inferior a 0,65 (UNEP, 1997), lo que se traduce en un marcado déficit hídrico. La zona extrandina recibe precipitaciones inferiores a 200 mm anuales que no posibilitaría la existencia de excedentes para recargar los acuíferos. Sin embargo, las mayores láminas de precipitación se producen en otoño e invierno cuando la evapotranspiración es baja (Gatica, 2017).

4.4 Unidades geológicas de interés

Las unidades que van a ser utilizadas y que presentan un interés en este trabajo son: Fm. Centenario, Fm. Rayoso y Gpo. Neuquén.

4.4.1 Formación Centenario

Está definida como potentes secuencias de sedimentitas terrígenas clásticas rojizas que se distribuyen de manera amplia principalmente en el Engolfamiento Neuquino y zonas aledañas a la Dorsal de Huincul. Sus depósitos abarcan desde el Valanginiano Superior hasta el Aptiano Inferior (Digregorio, 1972). Esta formación se divide en dos miembros, inferior y superior. El primero comienza con una ingresión marina seguida de variaciones del nivel del mar que depositan pelitas y areniscas de ambientes litoral, deltaico y fluvial. Hacia el tope, se observa una importante caída del nivel del mar en el Hauteriviano Inferior, generando depósitos continentales de areniscas fluviales o, hacia el sector oriental, la discordancia intra-Hauteriviana. Por otro lado, el miembro superior inicia con una nueva transgresión que deposita sedimentos pelíticos seguidos de areniscas y arcillitas intercaladas que representan nuevos ciclos transgresivo-regresivos causados por variaciones menores del nivel del mar.

4.4.2 Formación Rayoso

La Fm. Rayoso constituye una espesa unidad estratigráfica acumulada en amplios sectores del centro-oeste de la Cuenca Neuquina. Esta unidad se compone por una sucesión de hasta 1.200 m de areniscas finas, pelitas rojas, carbonatos y evaporitas, acumuladas en un medio predominantemente continental, el cual marca la desconexión definitiva de la Cuenca Neuquina con el paleo-océano Pacífico (Zabala y Ponce, 2011). La misma se encuentra compuesta por cuatro miembros, Rincón, Quili Malal, Pichi Neuquén y Cañadón de la Zorra. El Miembro Rincón de aproximadamente 250 m de espesor se encuentra suprayacentemente a la Fm. Huitrín de manera paraconcordante y

está compuesto por una alternancia de areniscas castaño-rojizas y fangolitas rojas. El Miembro Quili Malal (450 m de espesor) se caracteriza por una sucesión de arcilitas varicolores que alojan por lo menos 7 niveles de yeso y se reconocen por exhibir un característico bandeamiento. El Miembro Pichi Neuquén (120 m de espesor) está integrado por areniscas y fangolitas rojas. Por último, el Miembro Cañadón de la Zorra (70 m de espesor) incluye otra vez una asociación de arcilitas castaño rojizas y moradas con intercalaciones de banquitos de margas y yeso, así como algunos lentes de areniscas (Leanza *et al.*, 2001). Alonso (2016) concluye que el espesor de la Fm. Rayoso disminuye en sentido O-E y solo aflora en la región del Dorso de los Chihuidos donde alcanza un espesor de 450 m. En el Bajo de Añelo y el Alto de Entre Lomas, el espesor de esta unidad varía entre 400 m y 350 m y el tope se ubica por debajo de los 500 mbbp.

4.4.3 Grupo Neuquén

El Gpo. Neuquén ha quedado definido como una sucesión de depósitos continentales del Cretácico superior de la Cuenca Neuquina, limitados en su base por la discordancia Patagonídica (Keidel, 1917; Leanza, 2009) y en su techo por la discordancia Huantráiquica (Méndez *et al.*, 1987). Estas discordancias han sido ubicadas en la base del Cenomaniano (Leanza, 2009; Tunik *et al.*, 2010) y en el Campaniano Medio (Dingus *et al.*, 2009), respectivamente.

Estos depósitos del Gpo. Neuquén afloran en las regiones del Dorso de los Chihuidos y el Bajo de Añelo, y los espesores varían entre 100 m y 700 m, respectivamente. En el área del Alto Entre Lomas, afloran depósitos del Cretácico Superior – Paleógeno Temprano, que corresponden al Gpo. Malargüe (Legarreta y Uliana, 1999), por lo que las acumulaciones del Gpo. Neuquén se encuentran por debajo de los 200 mbbp con casi 800 m de espesor (Alonso, 2016).

Garrido (2010) divide al Gpo. Neuquén en tres subgrupos y nueve unidades formacionales litoestratigráficas. Dichas unidades son definidas en función de su composición litológica, mapeabilidad, distribución y continuidad regional (Figura 12).

Edad	Esquema litoestratigráfico vigente (*)	Esquema litoestratigráfico propuesto		
65.5 Ma	Grupo Malargüe (parcial)	Grupo Malargüe (parcial)		
Maastrichtiano				
70.6 Ma	Discordancia Huantráiquica			
Campaniano	Grupo Neuquén	Grupo Neuquén		
83.5 Ma			Subgrupo Río Colorado	F. Anacleto
			Santoniano	F. Bajo de la Carpa
85.8 Ma			Subgrupo Río Neuquén	F. Plottier
Coniaciano			Subgrupo Río Neuquén	F. Sierra Barrosa
				F. Los Bastos
88.6 Ma			Subgrupo Río Neuquén	F. Portezuelo
Turoniano				F. Cerro Lisandro
93.6 Ma	Subgrupo Río Limay	F. Huincul		
Cenomaniano	Subgrupo Río Limay	F. Candeleros		
		Discordancia Miránica Principal	Discordancia Patagonidica	
99.6 Ma				

Figura 12. Cuadro de unidades litoestratigráficas del Gpo. Neuquén. A la derecha del mismo se encuentra el esquema litoestratigráfico propuesto por Garrido, 2010.

El Subgrupo Río Limay constituye los depósitos basales del Gpo. Neuquén y se compone por la Fm. Candeleros y la Fm. Huincul. La Fm. Candeleros se compone por una sucesión predominantemente clástica de granulometría variable, ofreciendo una amplia variedad de componentes litológicos. Estos componentes litológicos, se encuentran conformados por areniscas cuarzólicas, 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 Gpo. Neuquén. Esta matriz es responsable, en gran medida, de la típica coloración morada a rojo hígado que caracteriza a estos depósitos. Por encima, de manera concordante se encuentra Fm. Huincul la cual posee extensos afloramientos en el sector oriental del Dorso de los Chihuidos, disminuyendo luego su espesor hacia el norte de la cuenca. Dentro de la Fm. Huincul es posible reconocer dos secciones sedimentarias. Una sección inferior de entre 20 y 70 m de espesor, compuesta principalmente por depósitos clásticos finos (areniscas finas y fangolitas) de tonalidades rojizas, gris verdosas y amarillentas pálidas. Ocasionalmente, esta sección puede presentar delgados lentes gravosos hacia la parte alta de la secuencia. La sección superior se conforma por una secuencia granodecreciente de 100 a 185 m de espesor, en la cual dominan los colores amarillentos (para los niveles psamíticos) y rojizos (para los niveles pelíticos). En la base de esta sección se desarrollan gruesos paquetes de areniscas medianas a gruesas, a veces conglomerádicas, con intercalaciones menores de fangolitas rojas y areniscas finas a limosas de tonalidades verdosas y gris-verdosas (Garrido, 2010).

Suprayacentemente se encuentra el Subgrupo Río Neuquén comprendido por las formaciones Cerro Lisandro, Portezuelo, Los Bastos, Sierra Barrosa y Plottier. Estas formaciones exhiben una sucesión alternante y variable de depósitos fangolíticos y arenosos, cuyo predominio de la fracción pelítica o psamítica para un intervalo determinado define a cada unidad formacional. En específico, la Fm. Cerro Lisandro se conforma mayoritariamente por depósitos clásticos finos, entre los que predominan monótonos y potentes bancos de fangolitas rojas. Se intercalan entre estas últimas, delgados niveles de limolitas y areniscas finas cuarzomicáceas, débilmente consolidadas, de tonalidades amarillentas y gris-verdosas (Garrido, 2010).

Por último, se encuentra el Subgrupo Río Colorado incluyendo a las formaciones Bajo de la Carpa y Anacleto, las cuales presentan alternancias de fangolitas, areniscas cuarzolíticas y conglomerados polimícticos (Garrido, 2010).

5 METODOLOGÍA

Para poder llevar a cabo este trabajo se analizaron datos de 36 muestras de fluido extraídas en un total de 16 pozos (sumideros y monitores) que se encuentran en el área de estudio (Figura 13). Dichas muestras fueron obtenidas mediante las diferentes metodologías mencionadas en el apartado 3.7, por lo tanto, se trabajó con muestras que abarcan un intervalo de profundidad y muestras puntuales. La profundidad de las muestras esta referenciada al nivel del mar True Vertical Depth Sub Sea (tvdss), correspondiendo los valores positivos por encima del mismo (msnm) y los negativos por debajo (mbnm).

5.1 Correlación

Dentro del marco litoestratigráfico propuesto por la empresa, utilizando el software Petrel, y a partir de los perfiles eléctricos y el control geológico de algunos de los pozos, se ubicaron en profundidad las muestras de agua y se realizó una correlación de las unidades geológicas de interés definiendo topes y bases de estas. Cuando no se tenía perfiles eléctricos dicha correlación se hizo en base a los controles geológicos y siguiendo la tendencia de espesor de las capas.

Para un mejor análisis, se confeccionaron 6 transectas en diferentes orientaciones abarcando cada una de ellas entre 4 y 5 pozos. Paralelamente se realizó el análisis hidroquímico de la totalidad de las muestras mediante el software Diagrammes obteniendo distintos gráficos de clasificación de familias hidroquímicas (diagramas de Piper, diagramas de Stabler y diagramas de Stiff). Para observar el grado evolutivo de las aguas en profundidad y en la lateral de las transectas se volcaron en cada uno de los perfiles de los pozos los diagramas de Stiff usando como valor máximo 100 meq/L en las muestras puntuales y 800 meq/L en las muestras que abarcan un intervalo por sus altas concentraciones. Las muestras correspondientes a Gpo. Neuquén y Fm. Rayoso fueron adquiridas en etapa de perforación mediante la herramienta MDT/RCI (denominación según la compañía que realizó el trabajo), y, las muestras correspondientes a la Fm.

Centenario se tomaron en etapa de terminación de los pozos, mediante pistoneo. A su vez, para complementar el estudio de la hidroquímica se realizó el diagrama de Piper y Stabler.

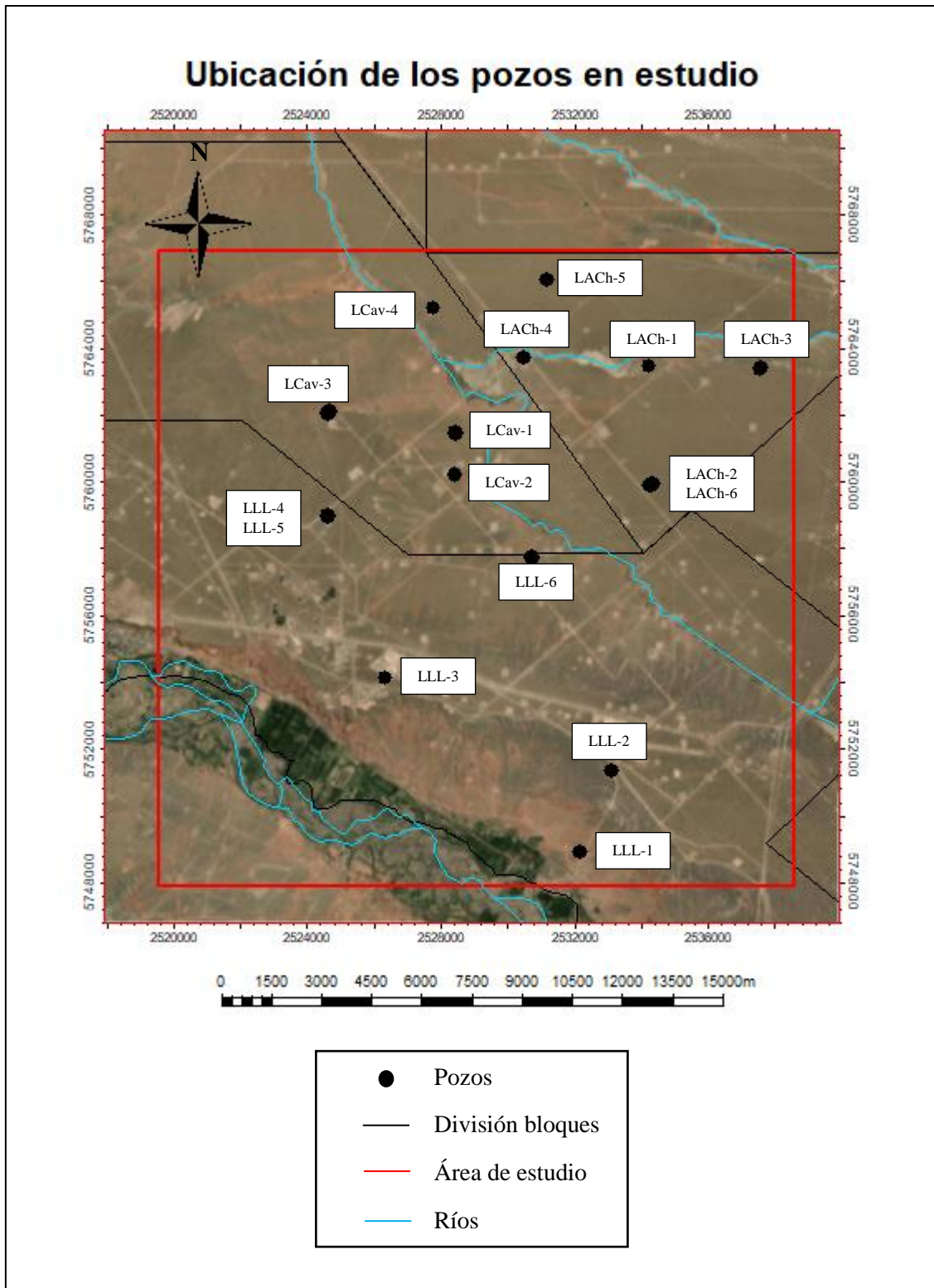


Figura 13. Ubicación de los pozos en estudio.

5.2 Clasificación de salinidad

La clasificación de salinidad se realizó en base al contenido de Sólidos Totales Disueltos (STD). Para dicha clasificación se utilizó la tabla de Davis y De Wiest (1967) (Tabla 1). La misma se realizó siguiendo un orden cronoestratigráfico según unidades geológicas y dentro de estas siguiendo un orden conforme al aumento de la profundidad.

Tipo de agua	STD en mg/L
Dulce	≤ 1.000
Salobre	1.000-10.000
Salada	10.000-100.000
Salmuera	≥ 100.000

Tabla 1. Clasificación del tipo de agua (Davis y De Wiest, 1967).

5.3 Clasificación aptitud de aguas

5.3.1 Aptitud para consumo humano

En el caso de la aptitud para consumo humano se utilizó el Artículo 982 - (Resolución Conjunta SCS y SAByDR N° 22/2021) del capítulo XII del Código Alimentario (Figura 14). En conjunto, se implementó el cuadro 5 del Anexo A “Normas de Calidad para el agua” de la ordenanza N° 12.395. Sanción: 1/12/2011. B.O.: 6/1/2012, Agua y Saneamiento, el cual involucra los valores guía para bario y molibdeno que el código alimentario no incluye (Figura 15). Por último, la Autoridad de Aplicación de la Ley 899 del Código de Aguas clasifica a determinados componentes según el grado de dificultad para ser tratados y en base a eso determinar la aptitud o no aptitud del fluido (Figura 16).

CAPÍTULO XII

BEBIDAS HÍDRICAS, AGUA Y AGUA GASIFICADA

AGUA POTABLE

Artículo 982 - (Resolución Conjunta SCS y SAByDR N° 22/2021)

[Se otorga a las empresas, a partir del 18 de agosto de 2021, un plazo de TRESCIENTOS SESENTA Y CINCO (365) días corridos para su adecuación.]

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.

El agua potable deberá cumplir con las características físicas, químicas y criterios microbiológicos siguientes:

Características físicas:

Turbiedad: máx. 3 NTU;
Color: máx. 5 escala Pt-Co;
Olor: sin olores extraños.

Características químicas:

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

Substancias inorgánicas:

Amoníaco (NH₄⁺) máx.: 0,20 mg/l;
Antimonio máx.: 0,02 mg/l;
Aluminio residual (Al) máx.: 0,20 mg/l;
Arsénico (As) máx.: 0,01 mg/l;
Boro (B) máx.: 0,5 mg/l;
Bromato máx.: 0,01 mg/l;
Cadmio (Cd) máx.: 0,005 mg/l;
Cianuro (CN⁻) máx.: 0,10 mg/l;
Cinc (Zn) máx.: 5,0 mg/l;
Cloruro (Cl⁻) máx.: 350 mg/l;
Cobre (Cu) máx.: 1,00 mg/l;
Cromo (Cr) máx.: 0,05 mg/l;
Dureza total (CaCO₃) máx.: 400 mg/l;

Fluoruro (F⁻): para los fluoruros la cantidad máxima se da en función de la temperatura promedio de la zona, teniendo en cuenta el consumo diario del agua de bebida:

- Temperatura media y máxima del año (°C) 10,0 - 12,0, contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,9; límite superior: 1,7;
- Temperatura media y máxima del año (°C) 12,1 - 14,6, contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,8; límite superior: 1,5;
- Temperatura media y máxima del año (°C) 14,7 - 17,6, contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,8; límite superior: 1,3;
- Temperatura media y máxima del año (°C) 17,7 - 21,4, contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,7; límite superior: 1,2;
- Temperatura media y máxima del año (°C) 21,5 - 26,2, contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,7; límite superior: 1,0;
- Temperatura media y máxima del año (°C) 26,3 - 32,6, contenido límite recomendado de Flúor (mg/l), límite inferior: 0,6; límite superior: 0,8

Hierro total (Fe) máx.: 0,30 mg/l;
Manganeso (Mn) máx.: 0,10 mg/l;
Mercurio (Hg) máx.: 0,001 mg/l;
Níquel (Ni) máx.: 0,02 mg/l;
Nitrato (NO₃⁻) máx.: 45 mg/l;
Nitrito (NO₂⁻) máx.: 0,10 mg/l;
Plata (Ag) máx.: 0,05 mg/l;
Plomo (Pb) máx.: 0,05 mg/l;
Selenio (Se) máx.: 0,01 mg/l;
Sólidos disueltos totales, máx.: 1500 mg/l;
Sulfatos (SO₄⁼) máx.: 400 mg/l;
Cloro activo residual (Cl) mín.: 0,2 mg/l.

Figura 14. Artículo 982 - (Resolución Conjunta SCS y SAByDR N° 22/2021) del capítulo XII del Código Alimentario.

CUADRO 5: COMPONENTES QUE AFECTAN LA SALUD CUYA PRESENCIA SE RECOMIENDA EVALUAR EN LA CIUDAD DE NEUQUEN. (1)

	Valor Guía	Unidad	Observaciones
COMPONENTES INORGÁNICOS			
Antimonio	0,005 (P)	mg/l	
Bario	0,7	mg/l	
Boro	0,3	mg/l	
Molibdeno	0,07	mg/l	
Níquel	0,02	mg/l	

Figura 15. Cuadro 5 del Anexo A “Normas de Calidad para el agua” de la ordenanza N° 12.395. Sanción: 1/12/2011. B.O.: 6/1/2012, Agua y Saneamiento.



Figura 16. Clasificación de los tratamientos de baja o mediana complejidad y alta complejidad según la Autoridad de Aplicación de la Ley 899 del Código de Aguas.

5.3.2 Aptitud para riego

La aptitud para riego se basó en las Normas de Riverside (Tabla 2 y Tabla 3) en conjunto con la tabla 5 del Decreto 831/93 de la Ley N° 24.051 “Residuos Peligrosos” (Tabla 4).

Richards (1954) propuso para el laboratorio de salinidad de Riverside, clasificar el peligro de salinización de los suelos según la conductividad eléctrica del agua utilizada para el riego de acuerdo con la Tabla 2.

Clases	Peligro de salinización	CE (mS cm ⁻¹ a 25°C)	Restricciones de uso
C1	Bajo	<0,25	Apta
C2	Moderado	0,25-0,75	Apta
C3	Medio	0,75-2,25	Apta con precauciones
C4	Alto	2,25-4	Apta con precauciones
C5	Muy Alto	4-6	No Apta

C6	Excesivo	>6	No Apta
----	----------	----	---------

Tabla 2. Criterios de peligro de salinización y restricciones de uso de las aguas empleadas para riego según el Laboratorio de Salinidad de Riverside.

Clase C1: agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.

Clase C2: agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.

Clase C3: agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.

Clase C4: agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.

Clase C5: agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.

Clase C6: agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.

El Laboratorio de Salinidad de Riverside clasifica la peligrosidad de sodificación del suelo por el agua de riego en función de su índice RAS (Relación de Adsorción de Sodio) (Tabla 3), que se calcula con la siguiente fórmula:

$$RAS = [Na^+] / ([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] / 2)^{1/2}$$

Las concentraciones de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} deben expresarse en $mmol_c.L^{-1}$

Clases	Peligro de sodificación	RAS	Restricciones de uso
S1	Baja peligrosidad sódica	0-10	Apta
S2	Mediana peligrosidad sódica	10-18	Apta con precauciones
S3	Alta peligrosidad sódica	18-26	Apta con precauciones
S4	Muy alta peligrosidad sódica	>26	No apta

Tabla 3. Clasificación del peligro de sodificación según el Laboratorio de Salinidad de Riverside.

Clase S1: bajo peligro de sodificación. Pueden usarse en casi todos los suelos sin riesgo de que el nivel del sodio de intercambio se eleve demasiado.

Clase S2: peligro de sodificación mediano. Estas aguas pueden usarse en suelos de textura gruesa o con buena permeabilidad. En suelos de textura fina o con drenaje deficiente, puede elevarse el sodio de intercambio, este efecto se ve atenuado en suelos con yeso.

Clase S3: alto peligro de sodificación. Son capaces de originar sodificación en casi todos los tipos de suelo, por lo que se requiere manejos técnicos específicos para mejorar el drenaje y lixiviado como a su vez, medidas correctivas como incorporación de yeso.

Clase S4: muy alto peligro de sodificación. Aguas inadecuadas para el riego, salvo condiciones de muy baja salinidad. El calcio proveniente del carbonato de calcio del suelo o del yeso puede disminuir el peligro de sodificación.

Constituyente peligroso	Nivel guía (ug/L)
Aluminio	5000
Arsénico	100
Berilio	100
Boro	500
Cadmio	10
Cinc	2000
Cobalto	50
Cobre	200
Cromo	100
Flúor	1000
Hierro	5000
Litio	2500
Manganeso	200
Molibdeno	10
Níquel	200
Paladio	5000
Plomo	200
Selenio	20
Uranio	10
Vanadio	100

Tabla 4. Niveles guía de calidad de agua para irrigación según el Decreto 831/93 de la Ley N° 24.051 "Residuos Peligrosos".

Por lo tanto, las clasificaciones del Laboratorio de Salinidad de Riverside vistas anteriormente se resumen en un gráfico presentado por Richards en 1954 y modificado en 1973 (Figura 17). Cabe resaltar que en la provincia del Neuquén la Autoridad de Aplicación de la Ley 899 del Código de Aguas impone que la clase C5 y C6 (en su totalidad) no son aptas para riego. Por lo tanto, el gráfico empleado en este trabajo corresponde a una modificación del propuesto por Richards (Figura 18).

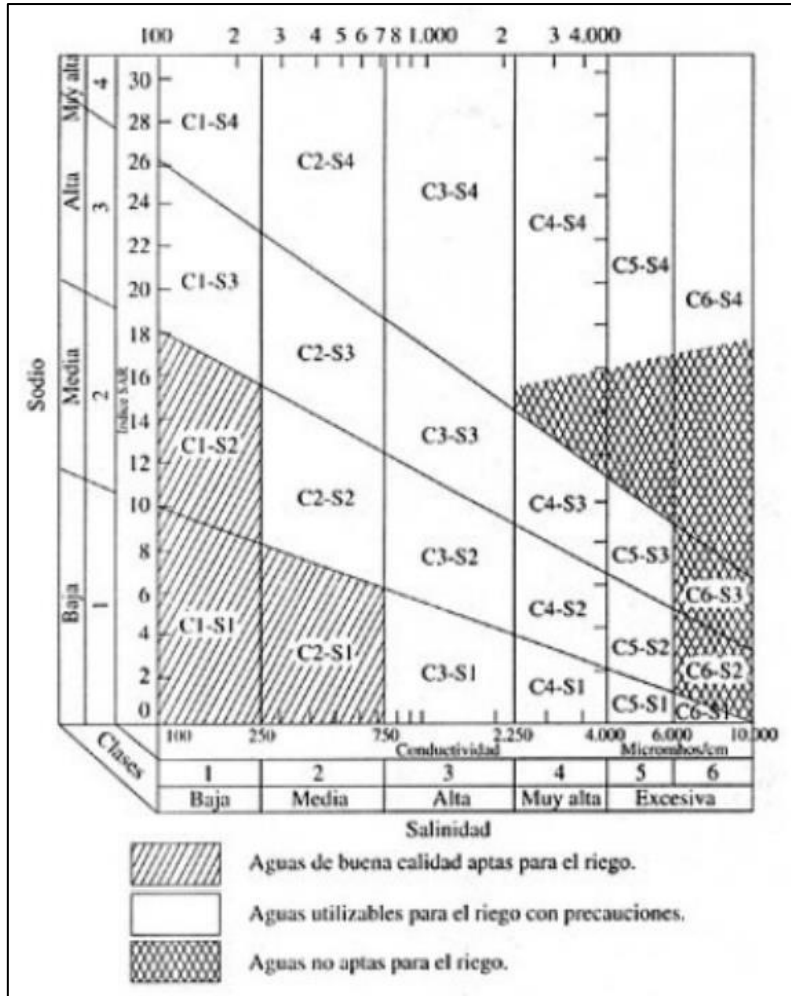


Figura 17. Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (U.S. Soil Salinity Laboratory) (Blasco y Rubia 1973).

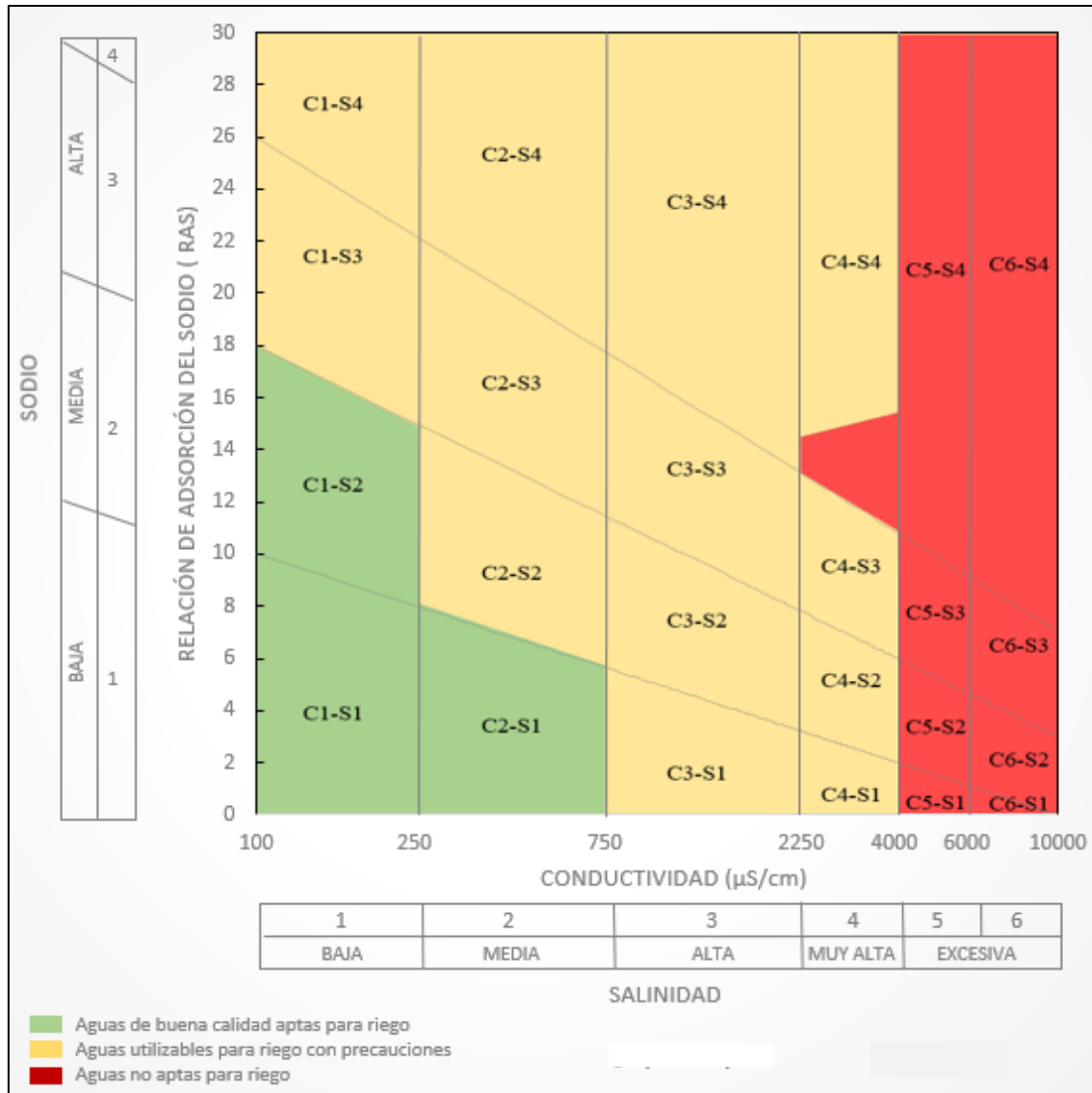


Figura 18. Gráfico de Riverside utilizado en este trabajo. Modificado de Blasco y Rubia (1973).

5.4 Familia hidroquímica

Para determinar la familia hidroquímica se utilizó la clasificación por iones dominantes que proponen Custodio y Llamas (1983). La misma consiste en nombrar el agua por el anión o el catión que sobrepasa el 50% de sus sumas respectivas; si ninguno supera el 50% se nombran los dos más abundantes. Se tienen en cuenta como aniones al HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^- y, como cationes al Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} . A su vez, se corroboró con los diagramas de Piper generados en el software Diagrammes.

En el ANEXO 1 se puede ver una tabla con todas las determinaciones que se hicieron para cada muestra de fluido con la cual se trabajó en este informe. A su vez, también se observa la fecha del muestreo y metodología utilizada.

5.5 Isotopía

Adicionalmente en algunas de las muestras se destinó una parte del volumen para la caracterización isotópica. Se utilizaron los valores de $\delta^2\text{H}$ ‰ y $\delta^{18}\text{O}$ ‰ y con ellos se generaron gráficos $\delta^{18}\text{O}$ ‰ vs $\delta^2\text{H}$ ‰ comparando las muestras analizadas con precipitaciones locales e isotopía del Río Neuquén y Río Colorado. Dicha información fue provista por el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS).

Los análisis realizados por el laboratorio, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, se informan en desviaciones por mil definidas como:

$$\delta = 1.000 \frac{R_M - R_E}{R_E} \text{‰}$$

Donde:

- δ : desviación isotópica en ‰
- M: muestra
- E: patrón internacional
- R: relación isotópica ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)

El patrón utilizado es Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW, Gonfiantini, 1978). Los errores analíticos son $\pm 0,2\text{‰}$ y $\pm 1,0\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ respectivamente.

5.6 Mapas

Se confeccionaron mapas isopáquicos y estructurales en las unidades geológicas de interés a partir de la determinación de los topes formacionales definidos anteriormente.

6 RESULTADOS

6.1 Pases formacionales

Los pases formacionales se pudieron identificar gracias a los perfiles eléctricos disponibles de cada uno de los pozos y junto con la información de cuting de los controles geológicos. Para una mejor visualización se ordenaron los perfiles eléctricos, junto con la litología, las muestras y los diagramas de Stiff en diferentes columnas “tracks” (Figura 19).

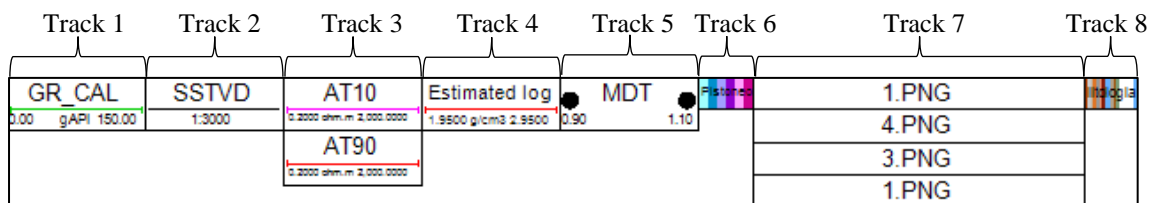
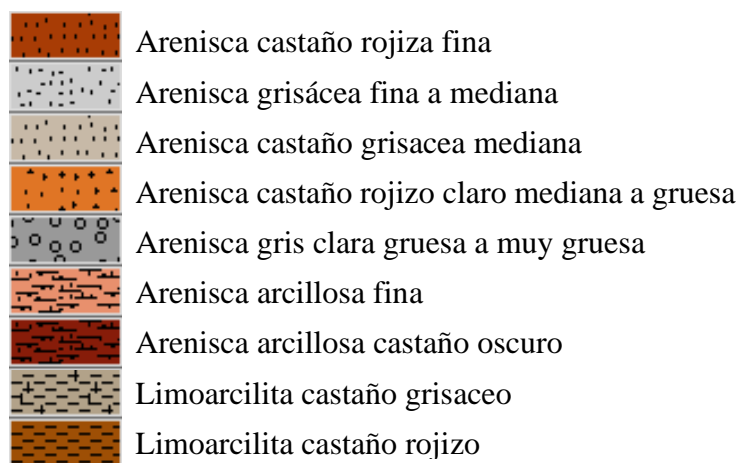


Figura 19. Encabezado de los perfiles eléctricos, junto con las muestras de fluido, diagramas y litología.

- Track 1: perfil Gamma Ray (GR).
- Track 2: profundidad (SSTVD) y escala 1:3000. El software utilizado “Petrel” considera los valores negativos por encima del nivel del mar y los positivos por debajo del mismo.
- Track 3: se visualiza la resistividad profunda (M2RX o AT90) y la resistividad somera (M2R1 o AT10) y en algunos casos la microresistiva (RXOZ).
- Track 4: curvas para estimar porosidad (densidad y neutrón). Se pueden visualizar como: HDRA ($1,95 \text{ g/cm}^3$ a $2,95 \text{ g/cm}^3$), Estimated log ($1,95 \text{ g/cm}^3$ a $2,95 \text{ g/cm}^3$), NPHI ($0,45 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a $-0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$), CNC ($0,45 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a $-0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$) o ZCOR ($1,95 \text{ g/cm}^3$ a $2,95 \text{ g/cm}^3$). Esta columna puede estar o no dependiendo de la información disponible.
- Track 5: muestras de agua tomadas por método MDT o RCI identificadas con un punto negro. Si no hay muestras el track no aparece.
- Track 6: muestras tomadas mediante pistoneo, se visualizan con un intervalo de color celeste. Si no hay muestras el track no aparece.
- Track 7: diagramas de Stiff.
- Track 8: litología. Para este track se trabajó con las siguientes litologías:



Para el caso de los topes de la Fm. Mulichinco, Fm. Centenario (miembro inferior y superior) y Fm. Rayoso este dato fue brindado por la empresa YPF, pero se corroboró con lo mencionado anteriormente. Específicamente en este informe, se hizo hincapié en identificar los topes de la Fm. Candeleros, Fm. Huincul (miembro superior e inferior) y la Fm. Cerro Lisandro.

En cuanto a la Fm. Candeleros la misma presenta un comportamiento en los perfiles eléctricos diferente a las unidades geológicas que se encuentran suprayacente y subyacente, lo que la hace fácil de identificar. A su vez, está compuesta por areniscas finas y medianas de coloración rojiza y en algunos casos grisáceas, con intercalaciones de niveles de arenisca arcillosa castaño oscuro y niveles pelíticos que aumentan su espesor hacia la base. En el área de estudio, el nivel basal presenta gran continuidad lateral que se observa en todos los pozos, por lo cual, se lo puede considerar como un buen sello semiregional.

Para el caso de la Fm. Huincul, la misma presentó un nivel de dificultad mayor a la Fm. Candeleros para su identificación, pero sin embargo se pudieron ubicar los topes de los dos miembros pertenecientes a esta formación (inferior y superior). Por un lado, el miembro inferior está compuesto por areniscas castaño rojizo claro medianas a gruesas, areniscas grisáceas finas a medianas y lentes de limoarcilitas castaño rojizo y castaño grisáceo. En cuanto al miembro superior, este presenta un espesor mayor que el inferior y se compone principalmente por areniscas castaño rojizo claro medianas a gruesas, en algunos casos areniscas grisáceas o castaño grisáceas finas a medianas, algunos niveles de areniscas gris claro gruesa a muy gruesa y presencia de lentes de limoarcilitas castañas que aumentan su espesor hacia el tope.

La Fm. Cerro Lisandro se compone principalmente por abundantes niveles de limoarcilita color castaño con intercalaciones de areniscas que varían desde tamaño fino hasta grueso a veces con una coloración castaña o castaña-grisácea. Por lo tanto, por el alto contenido de limoarcilitas dicha formación podría considerarse como otro nivel sello semiregional.

En el ANEXO 2 se pueden identificar los valores de los pases formacionales asignados o identificados a partir de este estudio.

6.2 Correlación

Se realizaron 6 transectas en diferentes orientaciones (Figura 20) para poder llevar a cabo la correlación de las unidades geológicas de interés. A su vez, se realizó un estudio en detalle de cada una de las secciones observando la evolución en la lateral y en profundidad dentro del área de estudio.

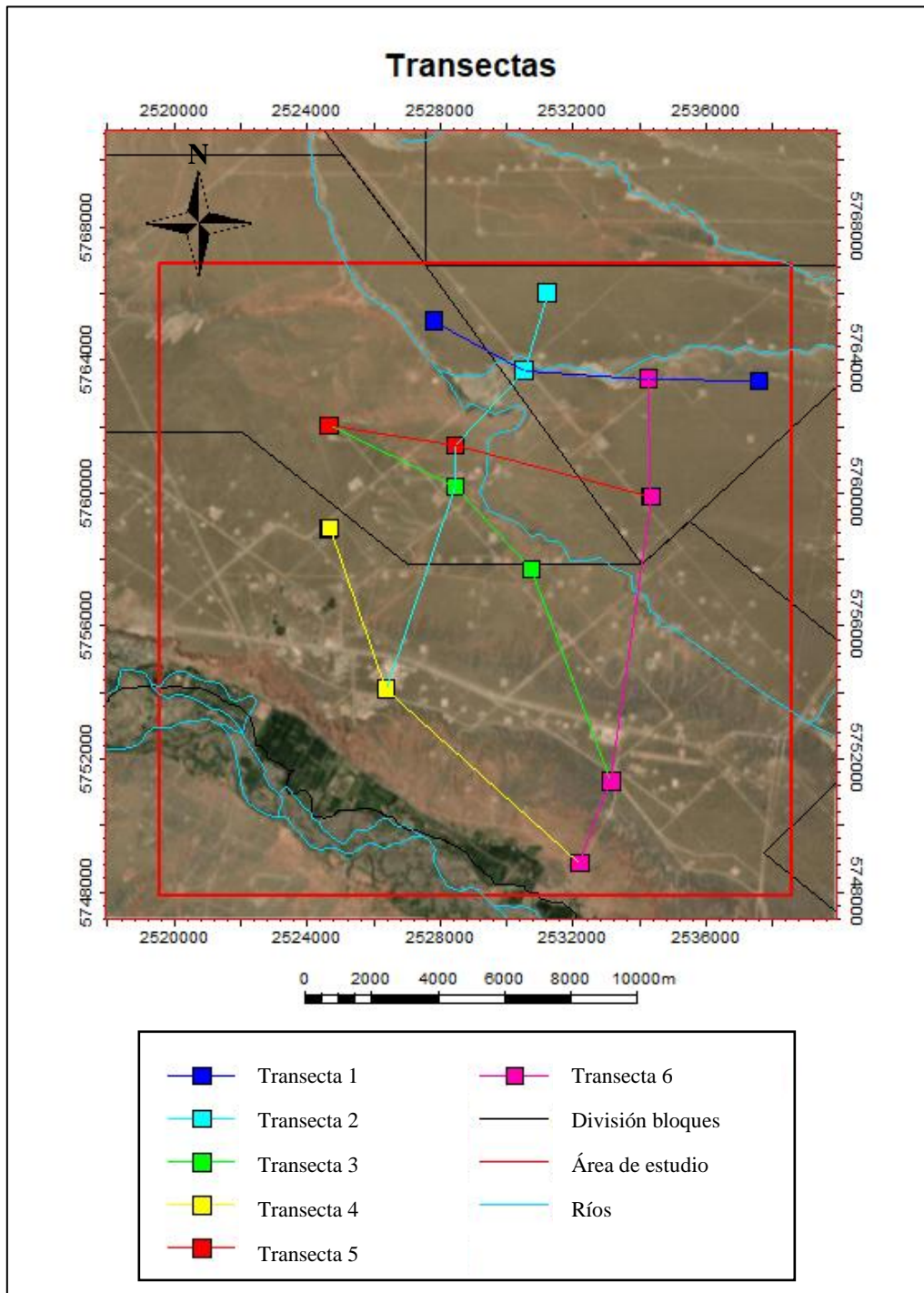


Figura 20. Transectas realizadas en el área de estudio.

6.2.1 Transecta 1

La transecta 1 abarca aproximadamente 11 km y se encuentra en el norte del área de estudio con orientación NO-E. Comprende los pozos LCav-4, LACH-4, LACH-1 y LACH-3 abarcando un total de 11 muestras de fluido (Figura 21, Figura 22 y Tabla 5).

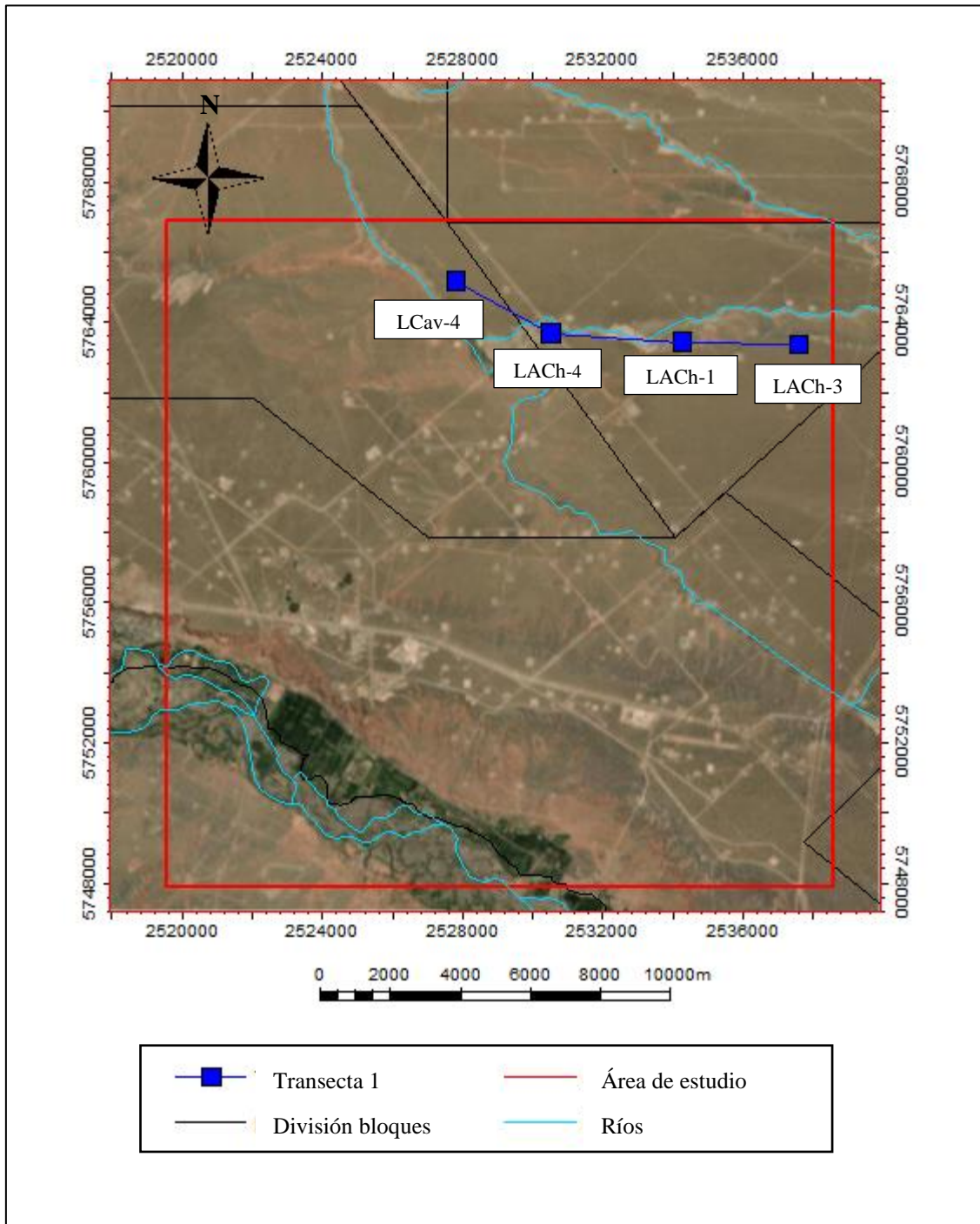


Figura 21. Ubicación de la transecta 1.

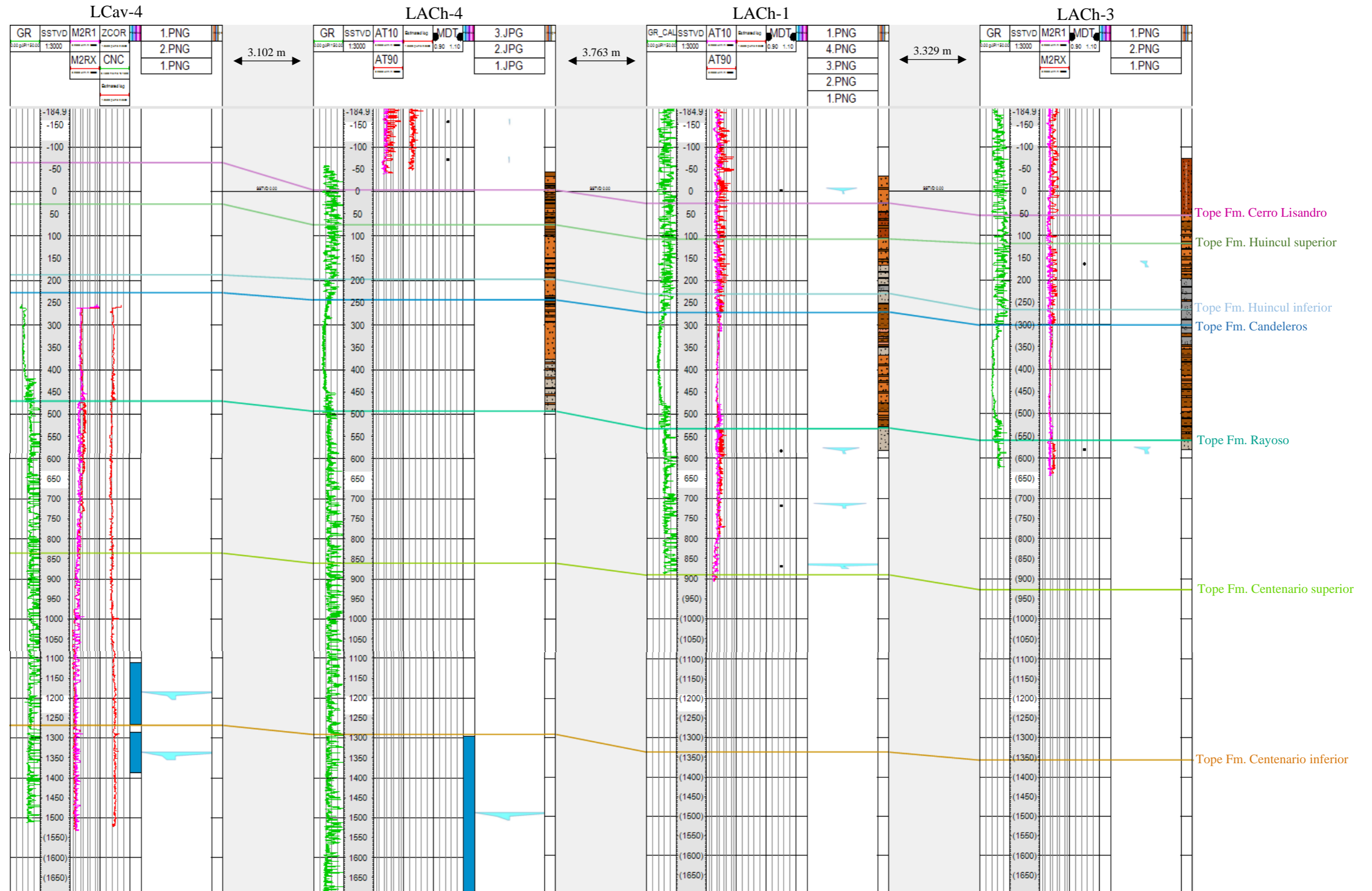


Figura 22. Transecta 1.

Pozo	Tipo de muestreo	Profundidad (tvdss)		Unidad	Familia hidroquímica
		Desde	Hasta		
LCav-4	PISTONEO	-1110,37	-1265,37	Fm. Centenario superior	Clorurada Sódica
LCav-4	PISTONEO	-1287,37	-1413,87	Fm. Centenario inferior	Clorurada Sódica
LACH-4	MDT	156,41	156,41	supra Fm. Cerro Lisandro	Bicarbonatada Sódica
LACH-4	MDT	71,41	71,41	supra Fm. Cerro Lisandro	Bicarbonatada Sódica
LACH-4	PISTONEO	-1295,59	-1688,59	Fm. Centenario inferior	Clorurada Sódica
LACH-1	MDT	1,78	1,78	supra Fm. Cerro Lisandro	Clorurada Sódica
LACH-1	MDT	-582,72	-582,72	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LACH-1	MDT	-718,22	-718,22	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LACH-1	MDT	-869,22	-869,22	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LACH-3	RCI	-163,67	-163,67	Fm. Huincul superior	Sulfatada Sódica
LACH-3	RCI	-581,67	-581,67	Fm. Rayoso	Clorurada-Sulfatada Sódica

Tabla 5. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 1.

El primer pozo de la transecta situado en el extremo NO corresponde a LCav-4 presentando 2 muestras mediante pistoneo, una correspondiente a la Fm. Centenario superior y otra a la misma formación, pero el miembro inferior. Ambas muestras presentan una familia hidroquímica clorurada sódica, pero con un aumento de calcio y cloruros en el miembro inferior.

A 3.102 m se encuentra el pozo LACH-4 con 2 muestras puntuales situadas por encima del tope de la Fm. Cerro Lisandro, y una muestra de pistoneo caracterizando a la Fm. Centenario inferior. Al igual que en el pozo anterior la Fm. Centenario inferior presenta una familia hidroquímica clorurada sódica con valores de los iones muy similares. Las dos muestras puntuales son bicarbonatadas sódicas.

El siguiente pozo en la sección corresponde a LACH-1 y presenta cuatro muestras tomadas con la herramienta MDT. Una por encima de la Fm. Cerro Lisandro y las otras tres en la Fm. Rayoso. La totalidad de las muestras presenta una familia clorurada sódica, pero queda evidenciado el aumento de los cloruros y el sodio con la profundidad.

El último pozo de esta sección corresponde a LACH-3 el cual presenta 2 muestras puntuales, una de ellas correspondiente al miembro superior de la Fm. Huincul y la otra a la Fm. Rayoso. La muestra más somera evidencia una familia hidroquímica sulfatada sódica y la correspondiente a la Fm. Rayoso es mezcla clorurada-sulfatada sódica.

En conjunto y observando la evolución lateral a lo largo de la sección se determina que hacia el E en el pozo LACH-3 la proporción de sulfatos sobre la totalidad de los aniones es mayor en la Fm. Rayoso, pasando de una familia clorurada sódica a una familia clorurada-sulfatada sódica. A su vez, se determina que el aumento de los cloruros y sodio está acompañado con el aumento de la profundidad.

Las familias de aguas correspondientes a esta sección quedan representadas en la Figura 23.

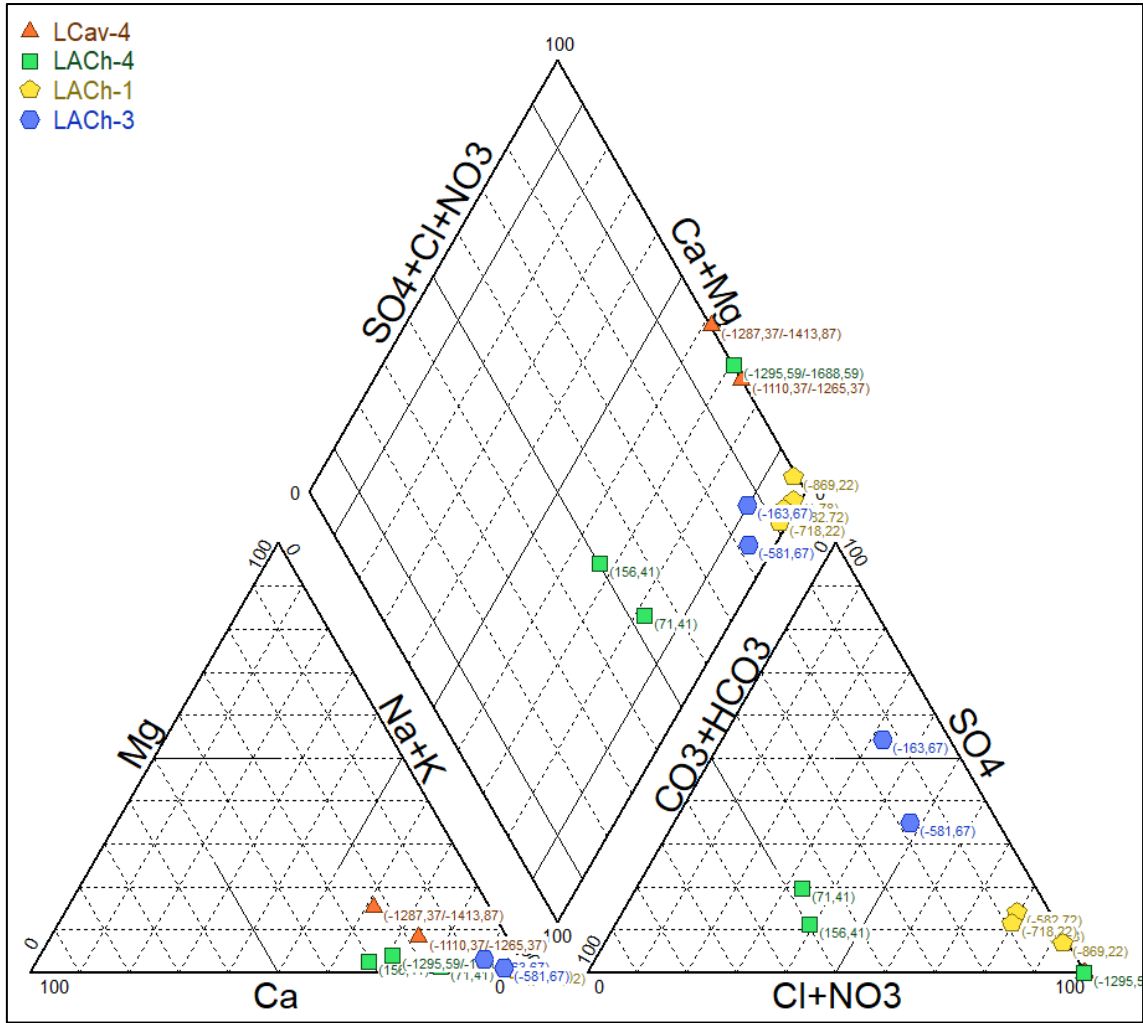


Figura 23. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 1.

6.2.2 Transecta 2

Esta sección se encuentra compuesta por los pozos LACH-5, LACH-4, LCav-1, LCav-2 y LLL-3 con un total de 9 muestras de las cuales 6 son puntuales y 3 abarcan un intervalo de muestreo. Presenta una orientación NE-SO con una longitud aproximada de 13 km (Figura 24, Figura 25 y Tabla 6).

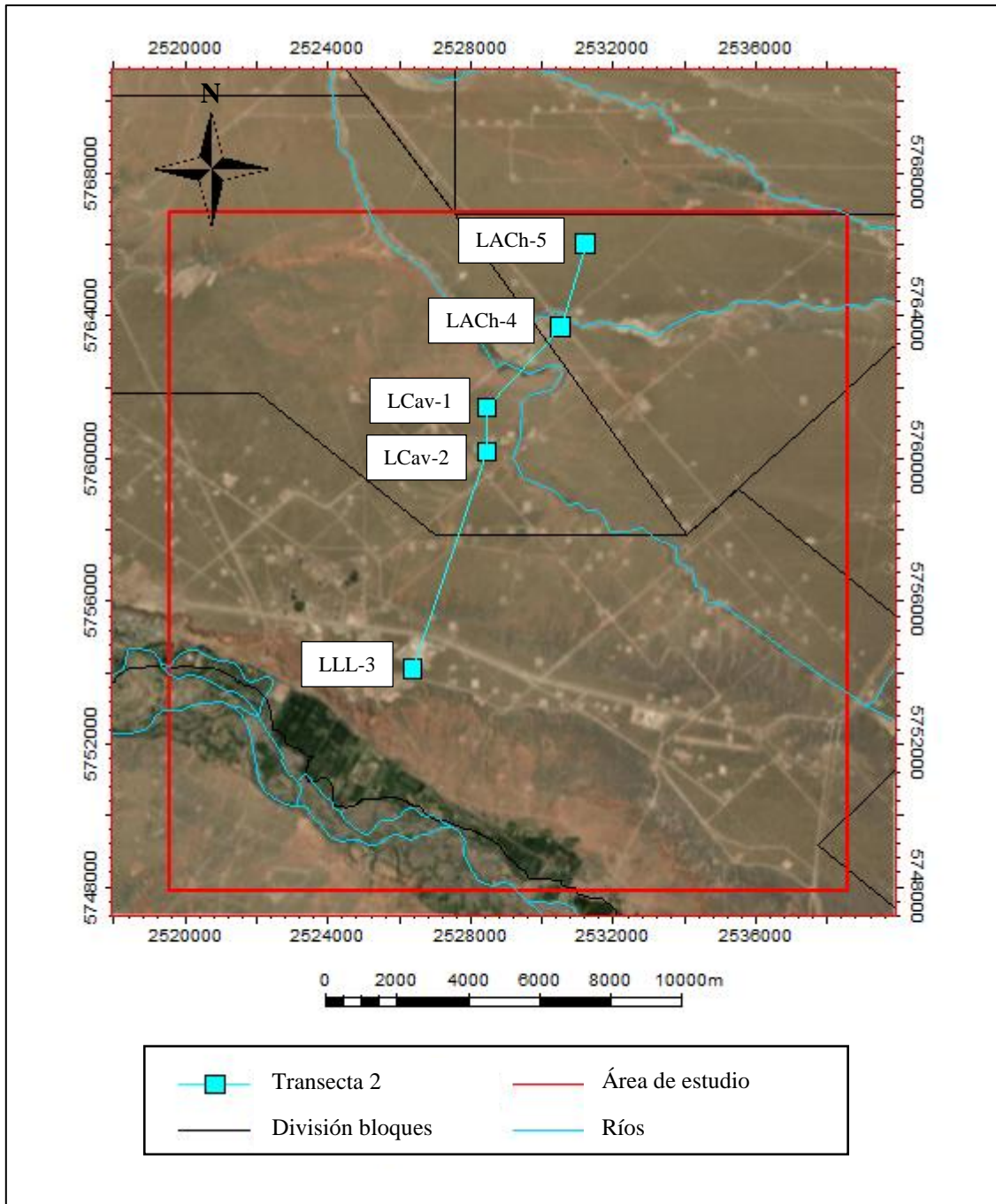


Figura 24. Ubicación de la transecta 2.

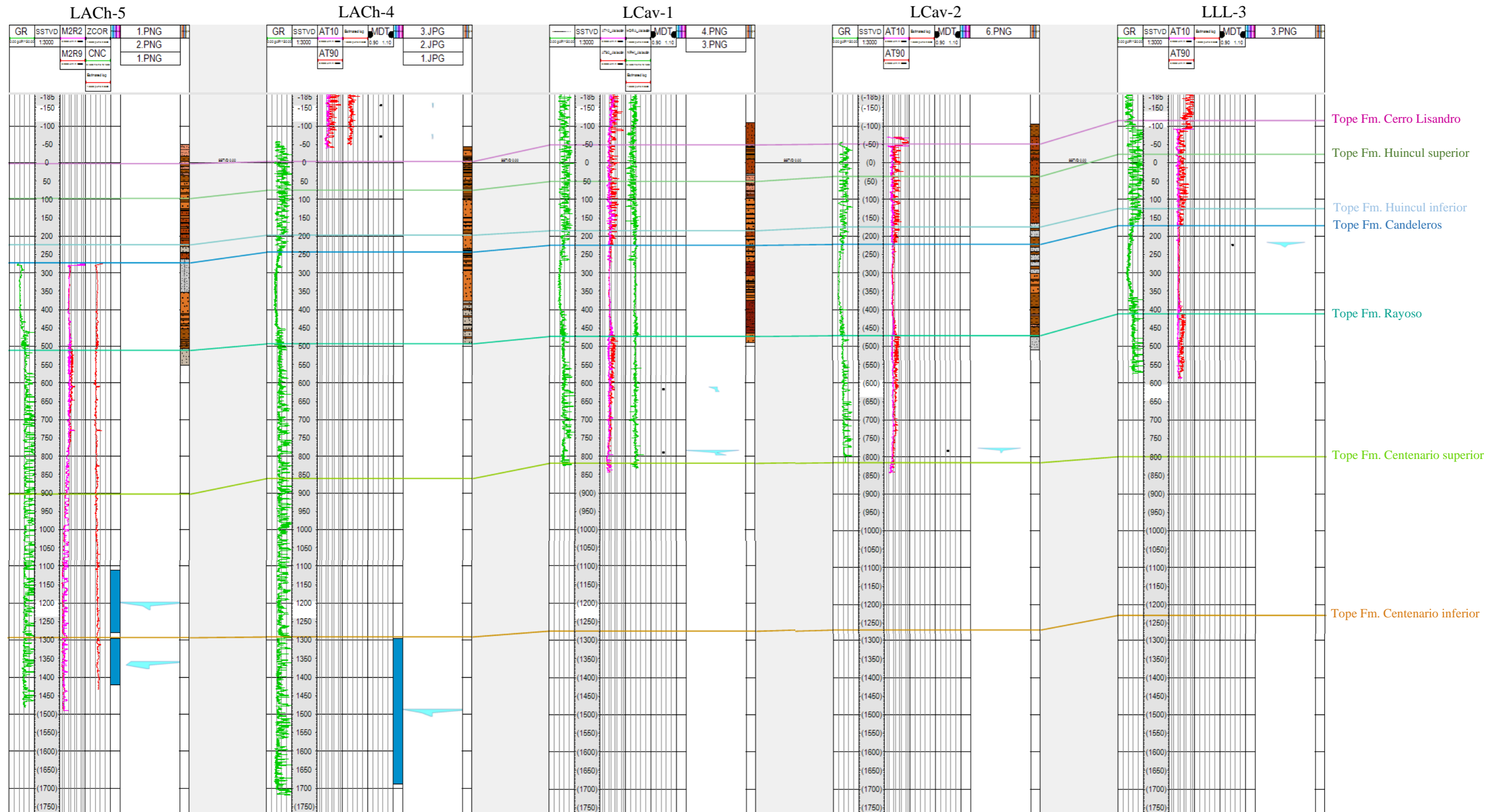


Figura 25. Transecta 2.

Pozo	Tipo de muestreo	Profundidad (tvds)		Unidad	Familia hidroquímica
		Desde	Hasta		
LACH-5	PISTONEO	-1110,54	-1280,54	Fm. Centenario superior	Clorurada Sódica
LACH-5	PISTONEO	-1295,59	-1420,54	Fm. Centenario inferior	Clorurada Cálcica
LACH-4	MDT	156,41	156,41	Gpo. Neuquén	Bicarbonatada Sódica
LACH-4	MDT	71,41	71,41	Gpo. Neuquén	Bicarbonatada Sódica
LACH-4	PISTONEO	-1295,59	-1688,59	Fm. Centenario inferior	Clorurada Sódica
LCav-1	MDT	-616,99	-616,99	Fm. Rayoso	Sulfatada Sódica
LCav-1	MDT	-789,99	-789,99	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LCav-2	MDT	-783,78	-783,78	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LLL-3	MDT	-223,78	-223,78	Fm. Candeleros	Clorurada Sódica

Tabla 6. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 2.

El primer pozo (LACH-5), ubicado en el sector NE presenta 2 muestras tomadas mediante pistoneo. Una de ellas representa al miembro superior de la Fm. Centenario y la otra al inferior. En este caso la muestra del miembro superior evidencia una familia clorurada sódica al igual que en la transecta anterior, pero, la muestra perteneciente al miembro inferior exhibe una familia clorurada cálcica.

El siguiente pozo al igual que en la transecta anterior corresponde a LACH-4. Tiene 2 muestras puntuales situadas por encima del tope de la Fm. Cerro Lisandro, y una muestra de pistoneo caracterizando a la Fm. Centenario inferior. Las dos muestras puntuales son bicarbonatadas sódicas y la perteneciente al miembro inferior de la Fm. Centenario, a diferencia del pozo anterior, clorurada sódica.

Siguiendo con la transecta se encuentra el pozo LCav-1, el cual contiene 2 muestras puntuales pertenecientes a la Fm. Rayoso. La que se encuentra hacia el tope de dicha formación exhibe una familia sulfatada sódica y la más profunda clorurada sódica.

A 1.249 m se encuentra el pozo LCav-2 que presenta una muestra puntual en la Fm. Rayoso con una familia hidroquímica clorurada sódica. Por último, se ubica el pozo LLL-3 con una muestra puntual en el tope de la Fm. Candeleros clorurada sódica.

Las familias de aguas correspondientes a esta sección quedan representadas en la Figura 26.

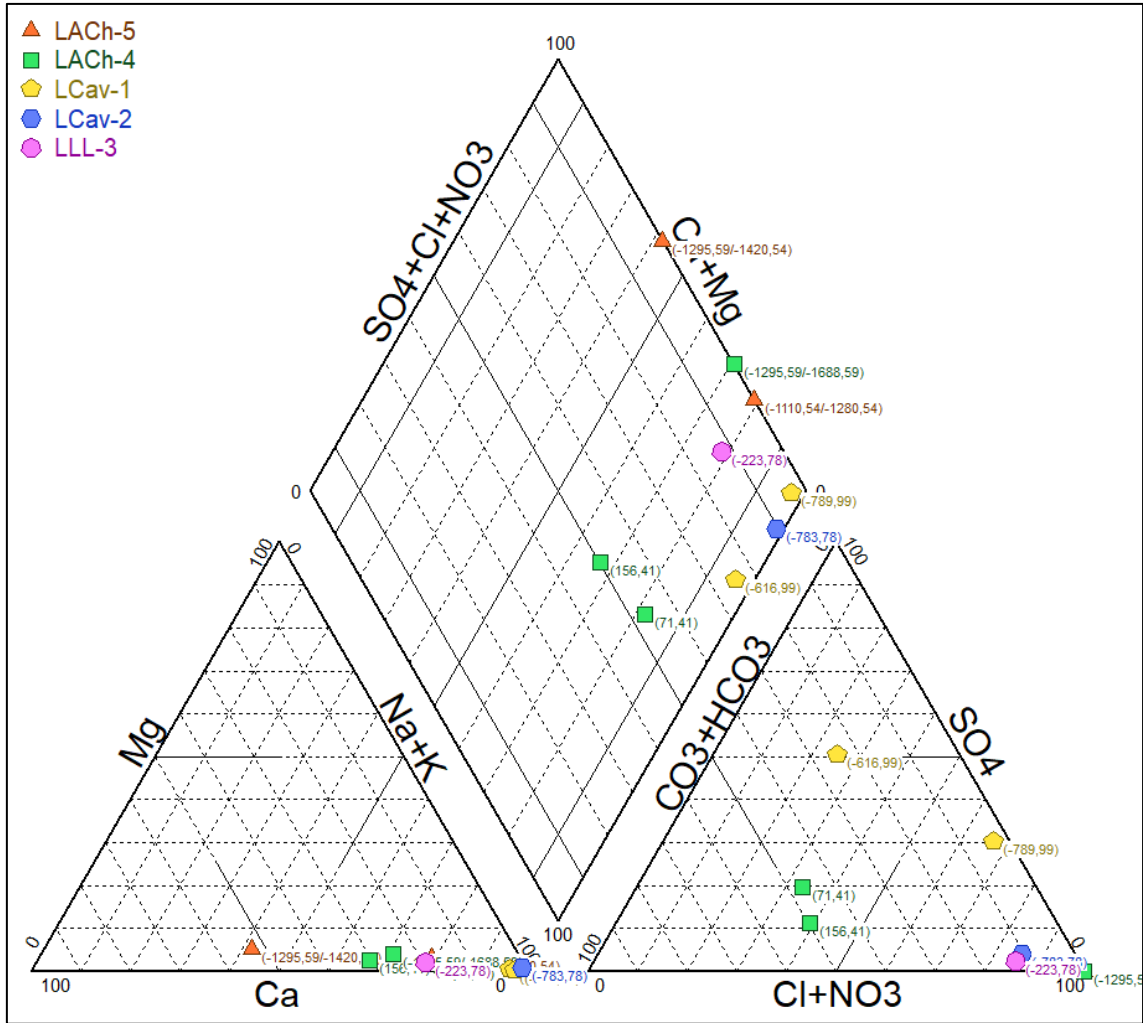


Figura 26. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 2.

6.2.3 Transecta 3

Esta sección está compuesta por los pozos LCav-3, LCav-2, LLL-6 y LLL-2 con un total de 8 muestras. Se extiende aproximadamente 14 km en sentido NO-SE (Figura 27, Figura 28 y Tabla 7).

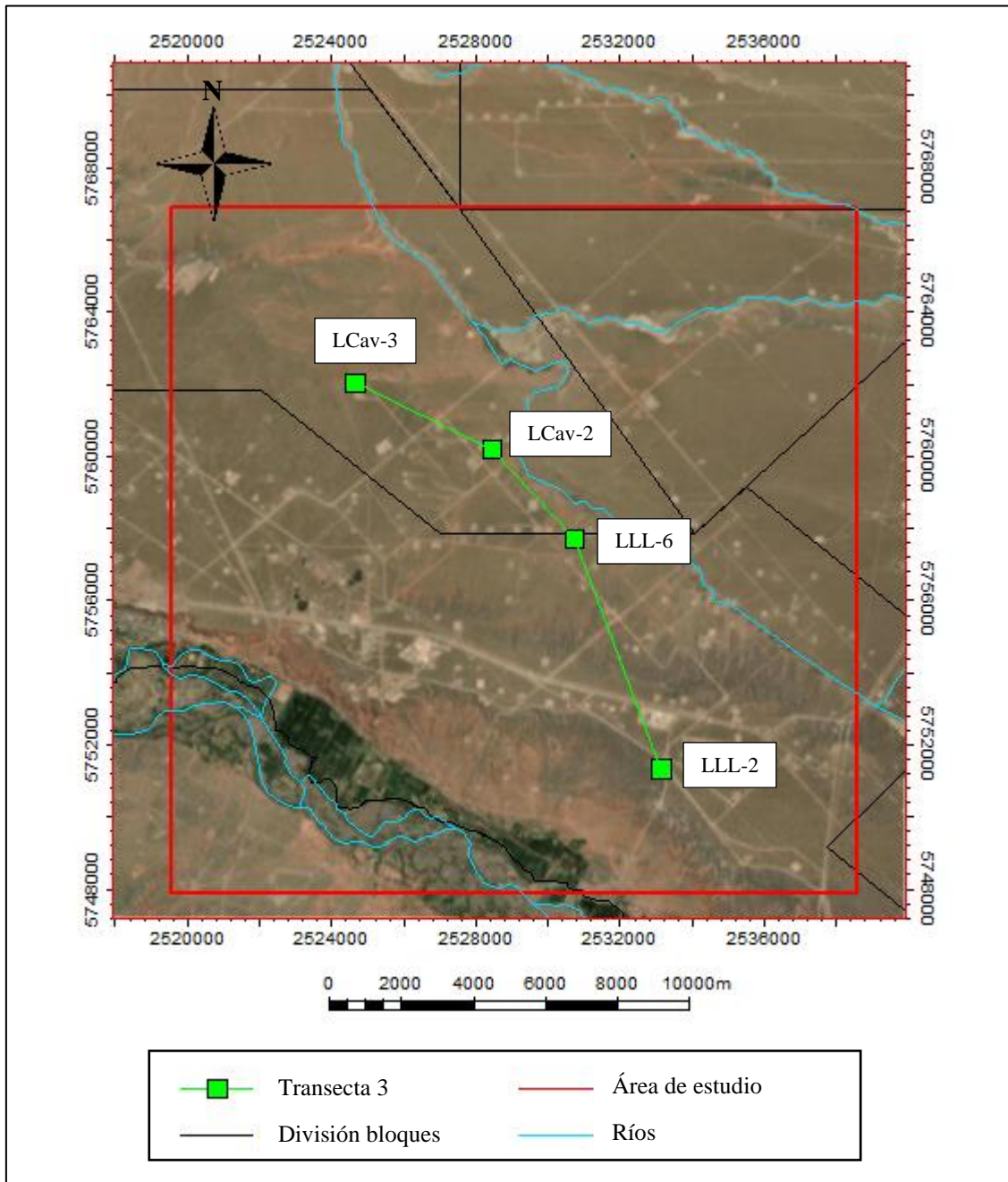


Figura 27. Ubicación de la transecta 3.

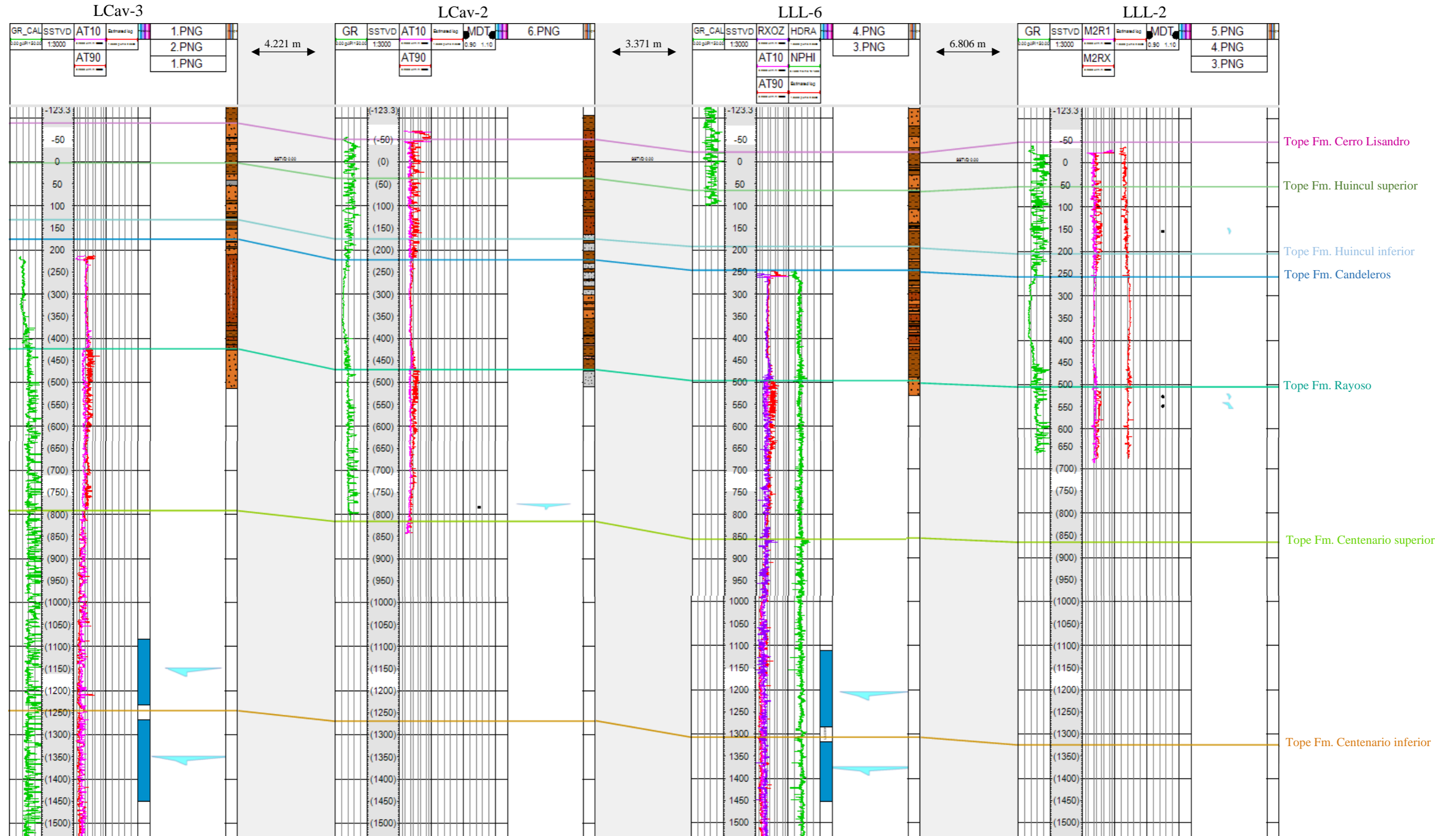


Figura 28. Transecta 3.

Pozo	Tipo de muestreo	Profundidad (tvdss)		Formación	Familia hidroquímica
		Desde	Hasta		
LCav-3	PISTONEO	-1083,24	-1233,64	Fm. Centenario superior	Clorurada Sódica
LCav-3	PISTONEO	-1265,94	-1451,24	Fm. Centenario inferior	Clorurada Sódica
LCav-2	MDT	-783,78	-783,78	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LLL-6	PISTONEO	-1110,30	-1283,80	Fm. Centenario superior	Clorurada Sódica
LLL-6	PISTONEO	-1317,30	-1452,30	Fm. Centenario inferior	Clorurada Sódica
LLL-2	RCI	-154,50	-154,50	Fm. Huincul superior	Bicarbonatada Sódica
LLL-2	RCI	-527,30	-527,30	Fm. Rayoso	Bicarbonatada Sódica
LLL-2	RCI	-548,10	-548,10	Fm. Rayoso	Sulfatada Sódica

Tabla 7. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 3.

El primer pozo que inicia esta transecta por el NO corresponde a LCav-3. El mismo cuenta con 2 muestras de pistoneo pertenecientes a la Fm. Centenario superior e inferior. Ambas muestras son cloruradas sódicas.

El siguiente pozo en la sección corresponde a LCav-2 y presenta una muestra tomada con la herramienta MDT en la Fm. Rayoso. Presenta una familia hidroquímica clorurada sódica, pero a diferencia de las muestras pertenecientes a la Fm. Centenario del pozo anterior con menor contenido iónico.

Continuando, se encuentra el pozo LLL-6 con 2 muestras que abarcan un intervalo de la Fm. Centenario superior e inferior. Al igual que en el pozo LCav-3 la familia es clorurada sódica.

Por último, se ubica el pozo LLL-2. El mismo presenta una muestra en la Fm. Huincul superior bicarbonatada sódica y 2 muestras correspondiente a la Fm. Rayoso. La que se encuentra en -527,3 mbnm es al igual que la más somera bicarbonatada sódica y la de -548,1 mbnm sulfatada sódica.

Las familias de aguas correspondientes a esta sección quedan representadas en la Figura 29.

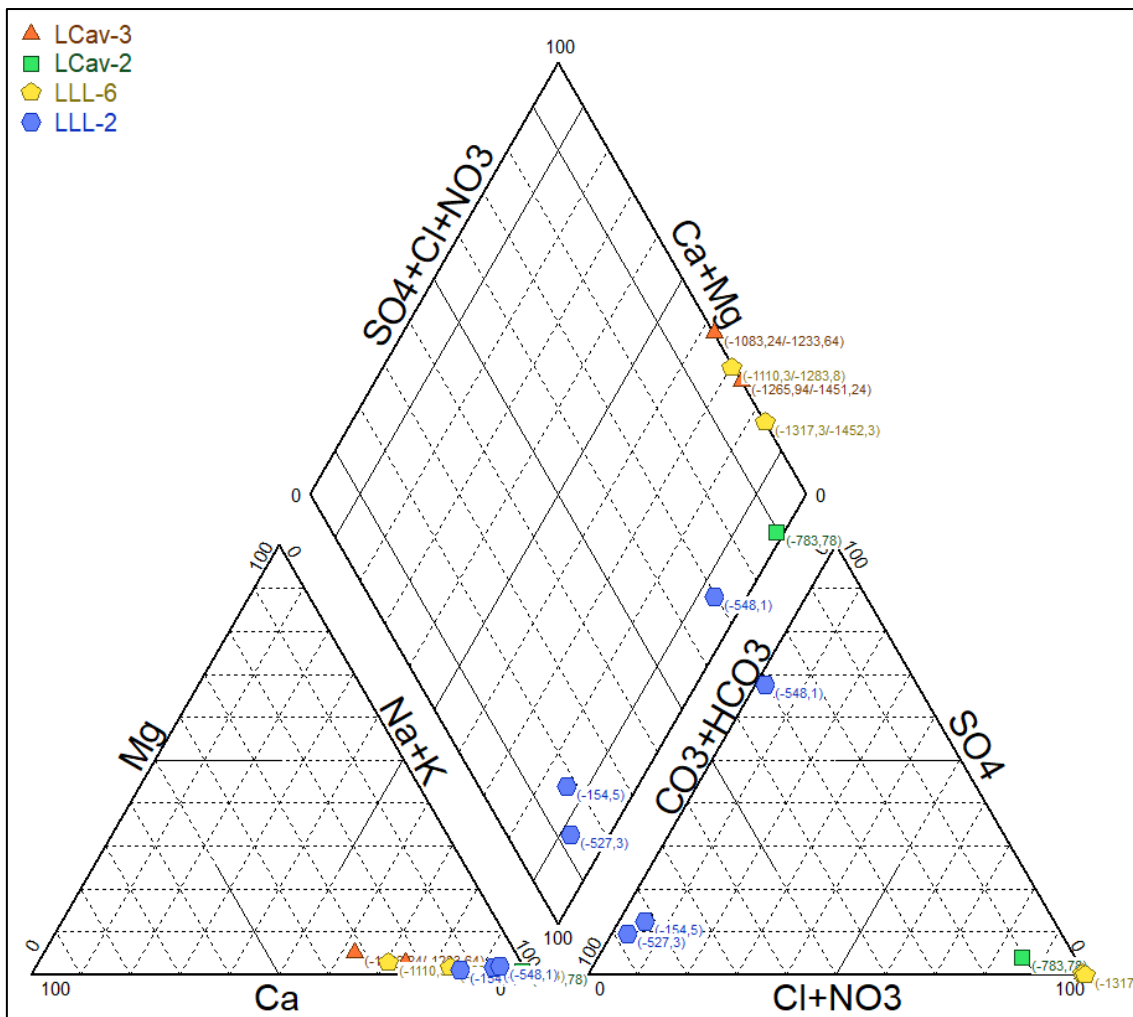


Figura 29. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 3.

6.2.4 Transecta 4

Esta sección abarca aproximadamente 13 km en sentido NO-SE y la constituyen los pozos LLL-5, LLL-4, LLL-3 y LLL-1 presentando un total de 8 muestras de agua (Figura 30, Figura 31 y Tabla 8).

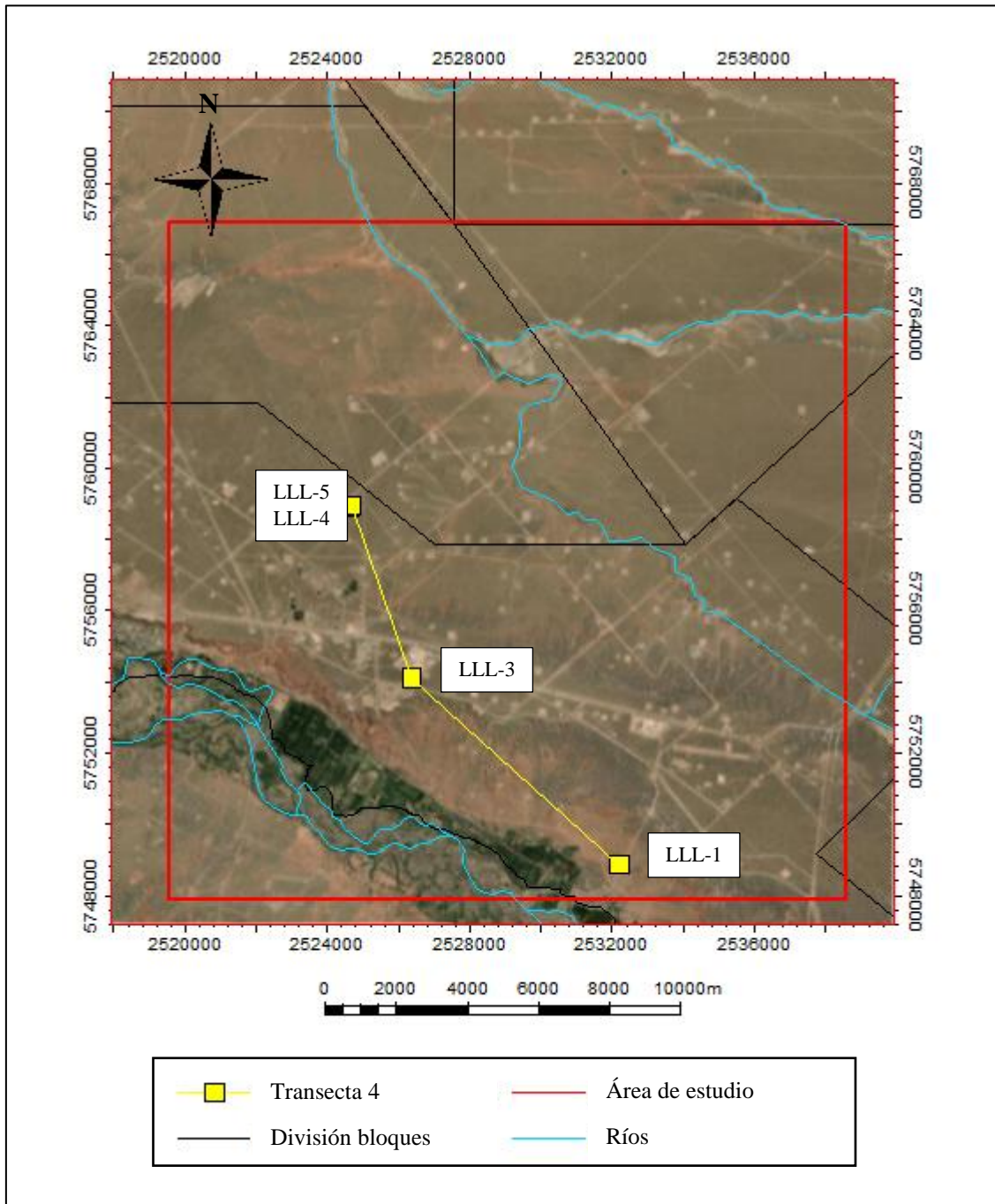


Figura 30. Ubicación de la transecta 4.

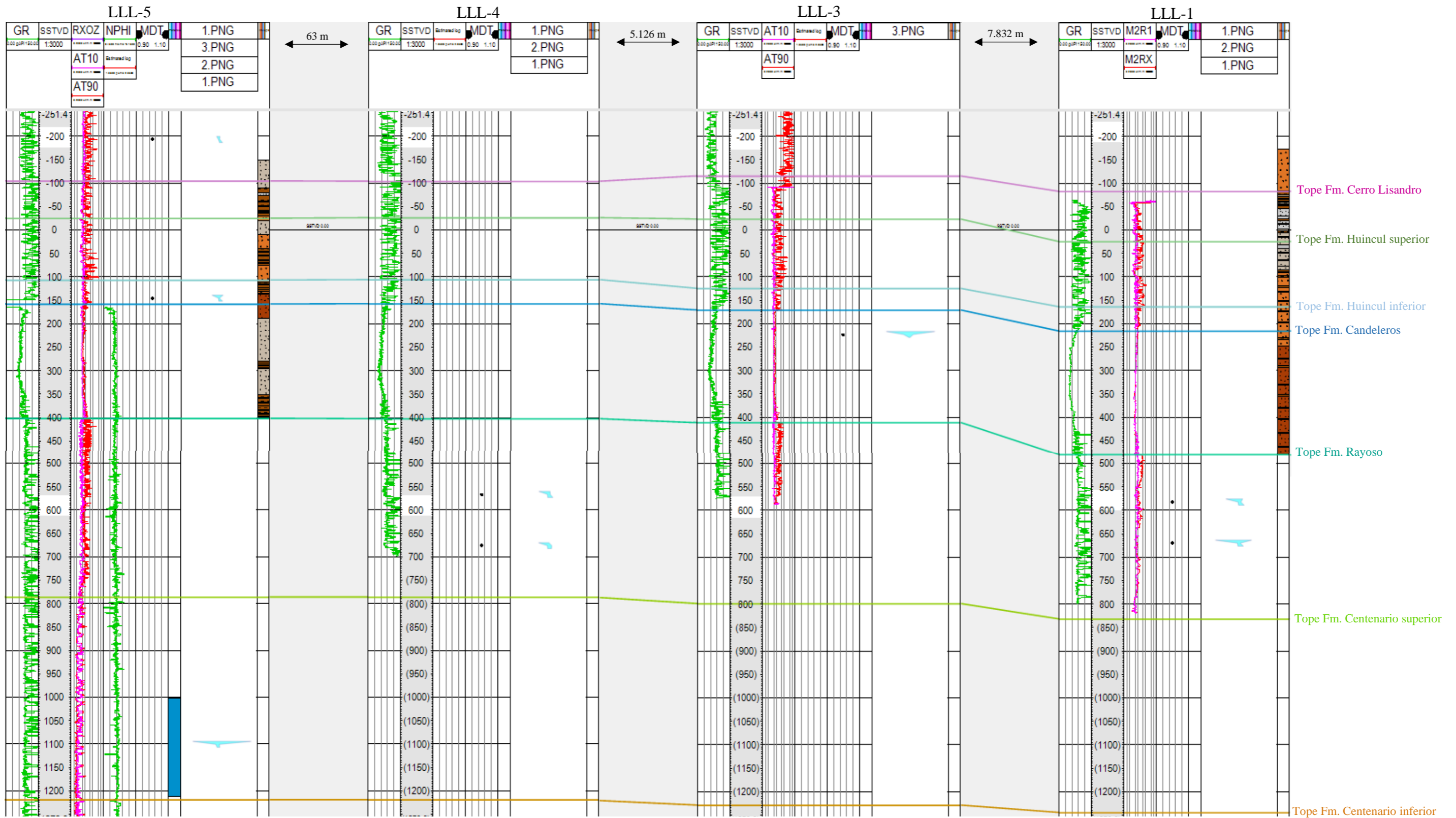


Figura 31. Transecta 4.

Pozo	Tipo de muestreo	Profundidad (tvdss)		Unidad	Familia hidroquímica
		Desde	hasta		
LLL-4	MDT	-567,35	-567,35	Fm. Rayoso	Sulfatada Sódica
LLL-4	MDT	-676,19	-676,19	Fm. Rayoso	Bicarbonatada Sódica
LLL-5	MDT	193,80	193,80	supra Fm. Cerro Lisandro	Sulfatada Sódica
LLL-5	MDT	-145,60	-145,60	Fm. Huincul inferior	Sulfatada Sódica
LLL-5	PISTONEO	-1002,20	-1213,20	Fm. Centenario superior	Clorurada Sódica
LLL-3	MDT	-223,78	-223,78	Fm. Candeleros	Clorurada Sódica
LLL-1	RCI	-582,80	-582,80	Fm. Rayoso	Sulfatada-Clorurada Sódica
LLL-1	RCI	-669,80	-669,80	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica

Tabla 8. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 4.

Esta transecta comienza por el NO con el par sumidero/monitor LLL-5 y LLL-4. La descripción de dichos pozos se realiza en conjunto porque se encuentran a solo 63 m uno del otro. En su totalidad contienen 5 muestras de fluido, de las cuales 1 se encuentra por encima del tope de la Fm. Cerro Lisandro, 1 corresponde a la Fm. Huincul inferior, 2 a la Fm. Rayoso y 1 al miembro superior de la Fm. Centenario. Las dos muestras más someras (193,8 msnm y -145,6 mbnm) presentan una familia hidroquímica sulfatada sódica, al igual que la de -567,35 mbnm. La muestra de -676,19 mbnm exhibe una familia bicarbonatada sódica y la correspondiente a la Fm. Centenario, clorurada sódica.

El siguiente pozo, LLL-3, contiene una sola muestra que caracteriza a la Fm. Candeleros del Gpo. Neuquén con una familia hidroquímica clorurada sódica. Por último, se encuentra el pozo LLL-1 con dos muestras puntuales correspondientes a la Fm. Rayoso en donde se visualiza que la más somera (-582,8 mbnm) corresponde a un agua de mezcla sulfatada-clorurada sódica, y la más profunda (-669,8 mbnm) clorurada sódica.

Queda demostrado al igual que en la transecta 2 el alto contenido iónico que presenta la base del Gpo. Neuquén, en específico la Fm. Candeleros. Si bien esta formación presenta diferencias litológicas en los pozos en donde se pudo observar, se compone principalmente por areniscas finas y medianas con intercalaciones de niveles pelíticos.

Las familias de aguas correspondientes a esta sección quedan representadas en la Figura 32.

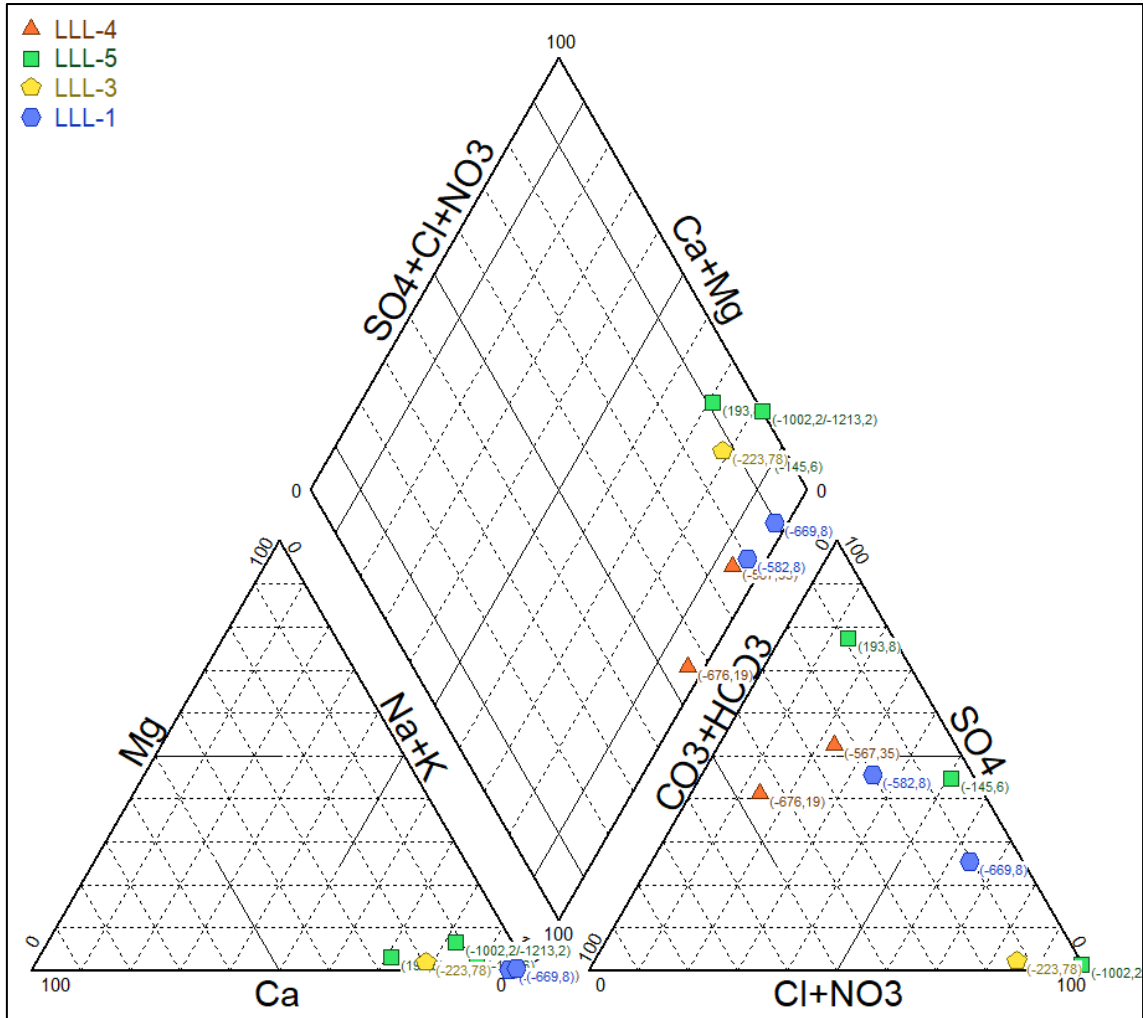


Figura 32. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 4.

6.2.5 Transecta 5

Esta transecta se compone de los pozos LCav-3, LCav-1, LACH-2 y LACH-6 abarcando aproximadamente 10 km en sentido O-E y presenta un total de 16 muestras (Figura 33, Figura 34 y Tabla 9).

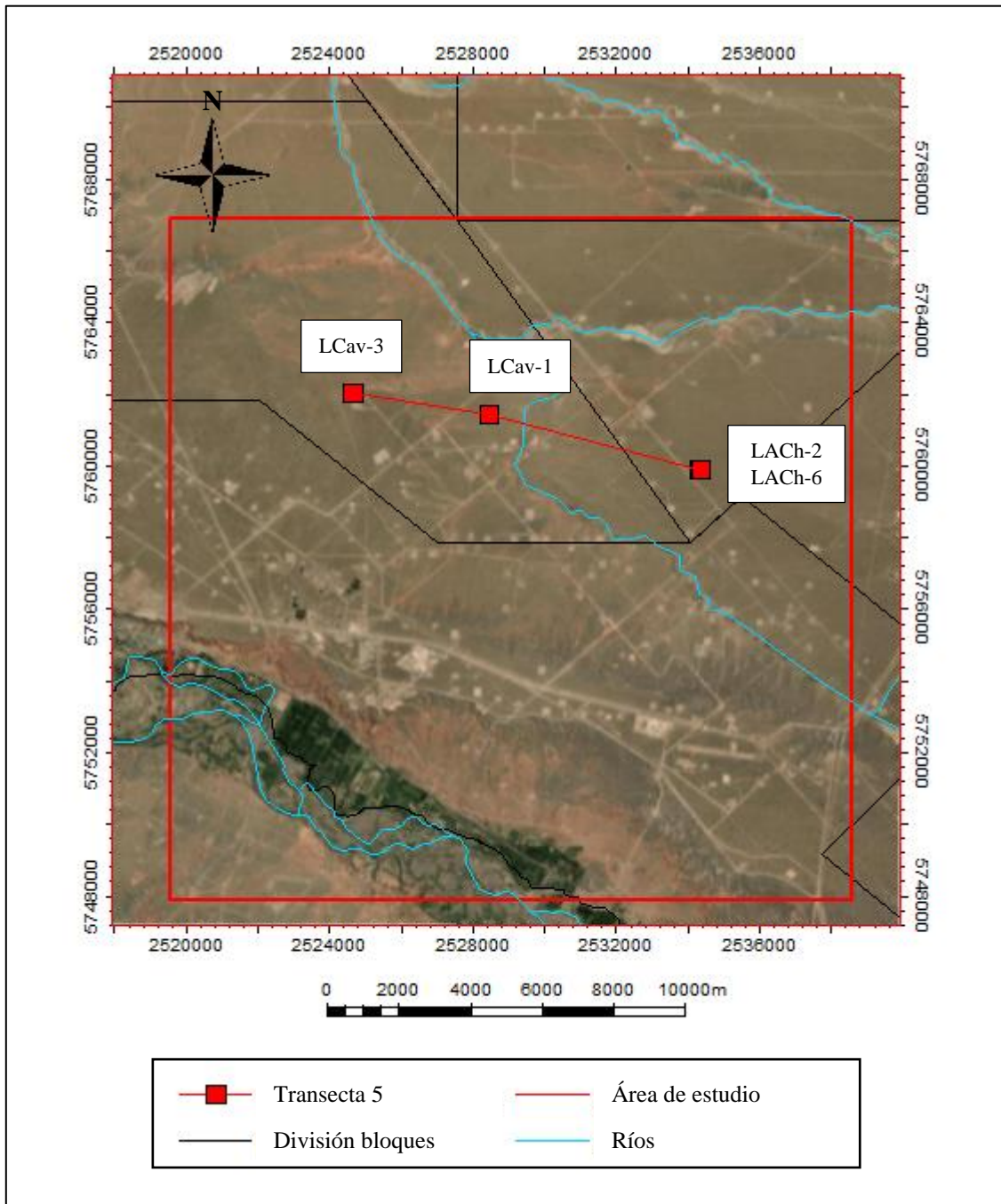


Figura 33. Ubicación de la transecta 5.

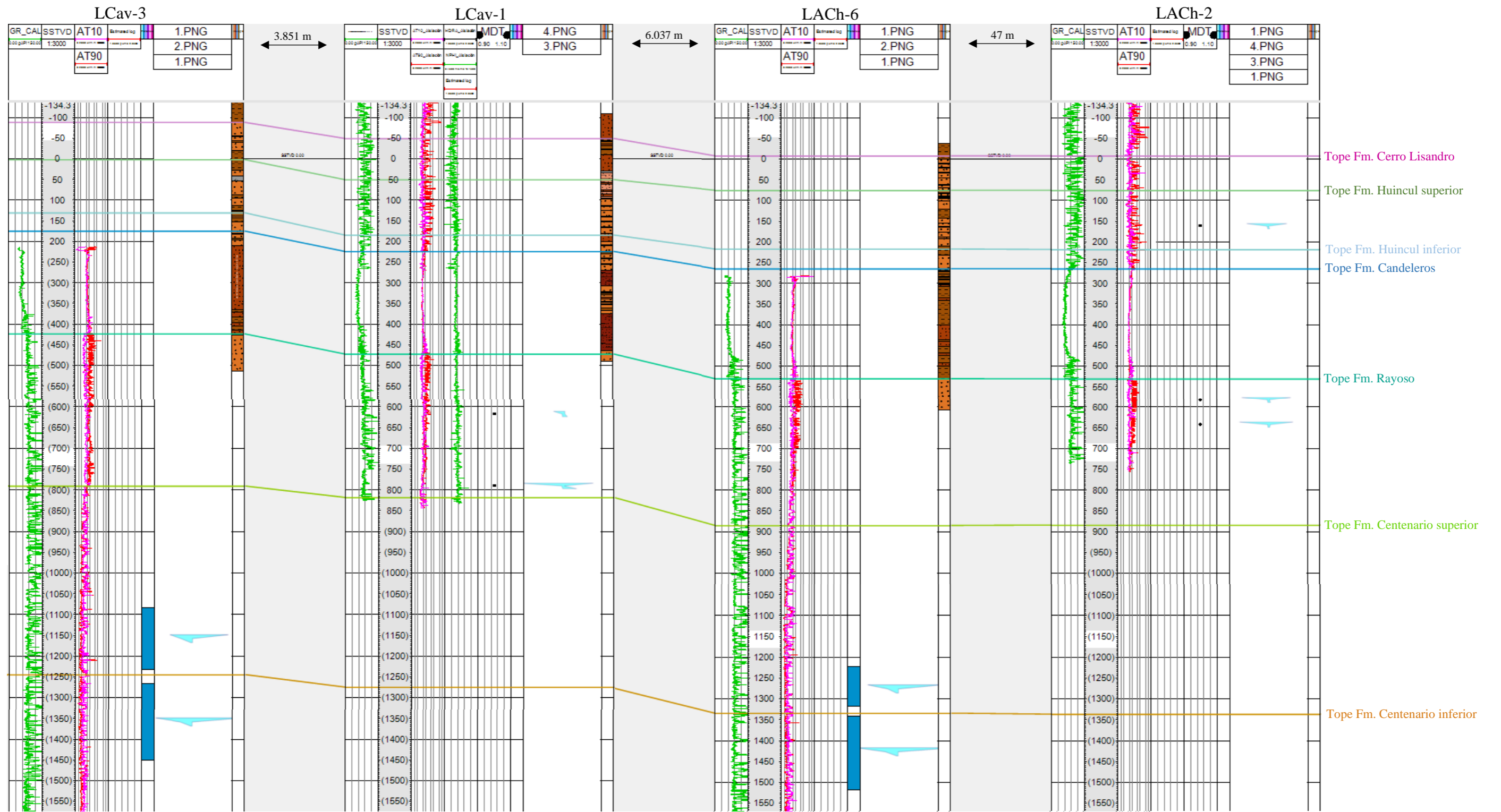


Figura 34. Transecta 5.

Pozo	Tipo de muestreo	Profundidad (tvds)		Formación	Familia hidroquímica
		Desde	Hasta		
LCav-3	PISTONEO	-1083,24	-1233,64	Fm. Centenario superior	Clorurada Sódica
LCav-3	PISTONEO	-1265,94	-1451,24	Fm. Centenario inferior	Clorurada Sódica
LCav-1	MDT	-616,99	-616,99	Fm. Rayoso	Sulfatada Sódica
LCav-1	MDT	-789,99	-789,99	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LACH-2	MDT	-161,00	-161,00	Fm. Huincul superior	Clorurada Sódica
LACH-2	MDT	-582,14	-582,14	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LACH-2	MDT	-642,43	-642,43	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LACH-6	PISTONEO	-1223,24	-1317,74	Fm. Centenario superior	Clorurada Sódica
LACH-6	PISTONEO	-1340,74	-1518,74	Fm. Centenario inferior	Clorurada Sódica

Tabla 9. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 5.

Iniciando por el O, se encuentra el pozo LCav-3 el cual presenta 2 muestras, una correspondiente al miembro superior de la Fm. Centenario y otra al miembro inferior de la misma formación. Ambas muestras son cloruradas sódicas, pero se observa un mayor contenido de sodio y cloruros en el miembro inferior.

Siguiendo por la sección hacia el E se ubica el pozo LCav-1. Contiene 2 muestras puntuales pertenecientes a la Fm. Rayoso. La que se encuentra hacia el tope de dicha formación exhibe una familia sulfatada sódica y la más profunda clorurada sódica.

A 6.037 m se encuentra el par sumidero/monitor LACH-6 y LACH-2. En su totalidad presentan 3 muestras puntuales (una en el miembro superior de la Fm. Huincul y 2 en la Fm. Rayoso) y 2 que abarcan un intervalo (una en cada miembro de la Fm. Centenario). Todas las muestras exhiben una familia hidroquímica clorurada sódica.

Observando en la lateral existe una variación en la familia hidroquímica en el tope de la Fm. Rayoso. En el pozo LCav-1 del bloque Bandurria se caracteriza por ser sulfatada sódica y en el pozo LACH-2, clorurada sódica. A su vez, queda demostrado que con el aumento de la profundidad existe un aumento de los iones.

Todas las familias de aguas correspondientes a esta sección quedan representadas en el gráfico de Piper de la Figura 35.

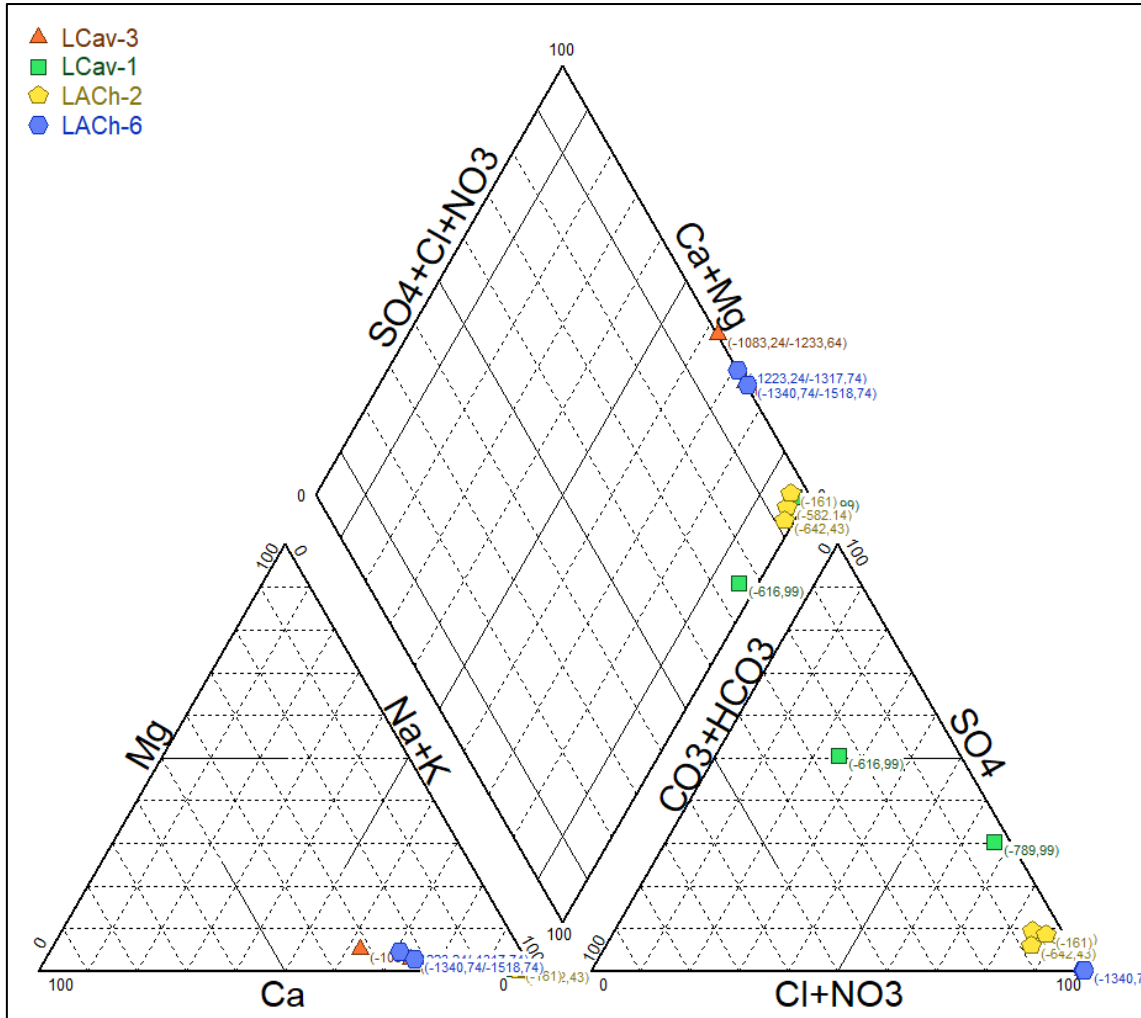


Figura 35. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 5.

6.2.6 Transecta 6

La sección 6 abarca aproximadamente 14 km en sentido N-S, involucrando los bloques La Amarga Chica y Loma Campana. Se compone por los pozos LACH-1, LACH-2, LACH-6, LLL-2 y LLL-1 con un total de 14 muestras de agua (Figura 36, y Tabla 10).

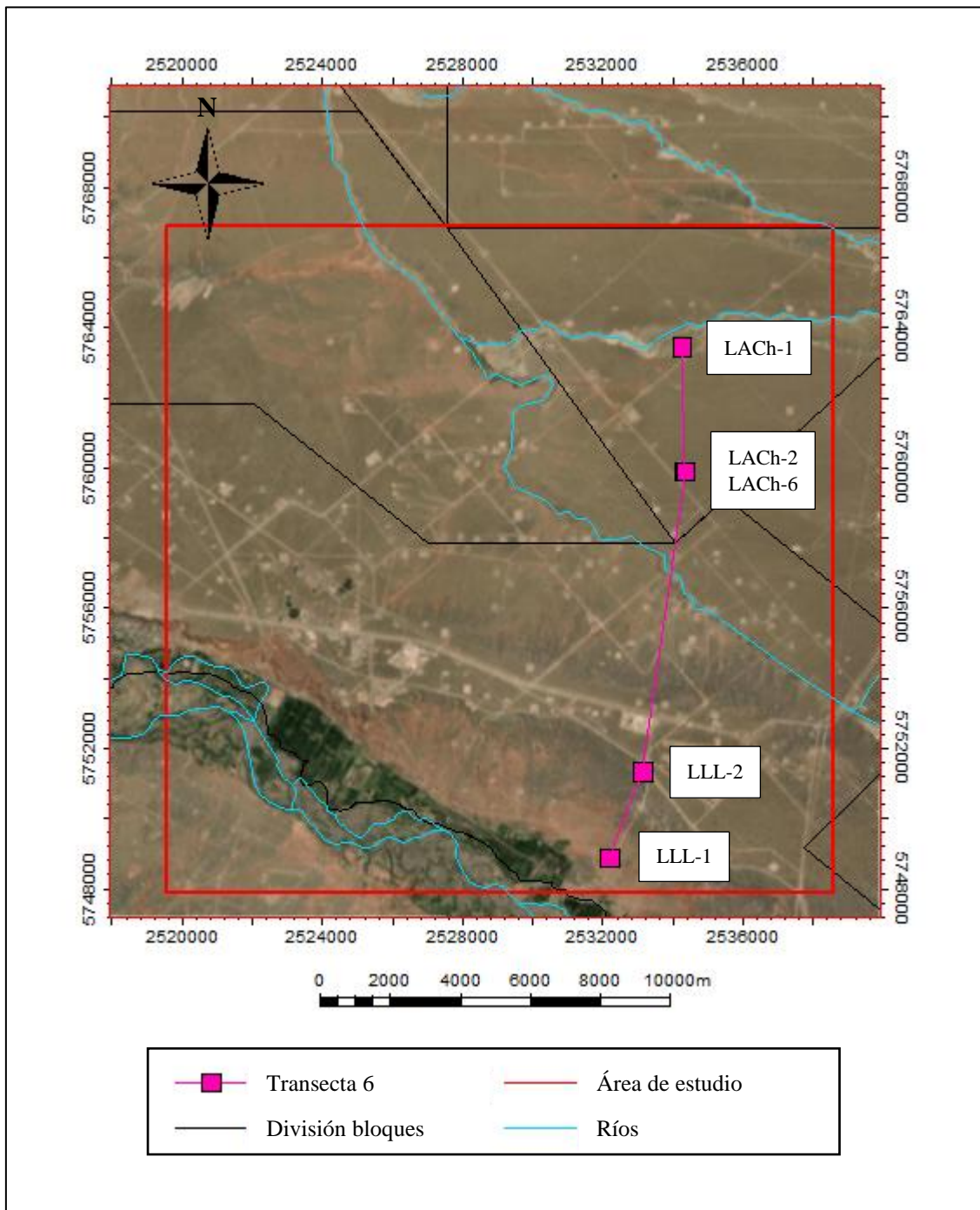


Figura 36. Ubicación de la transecta 6.

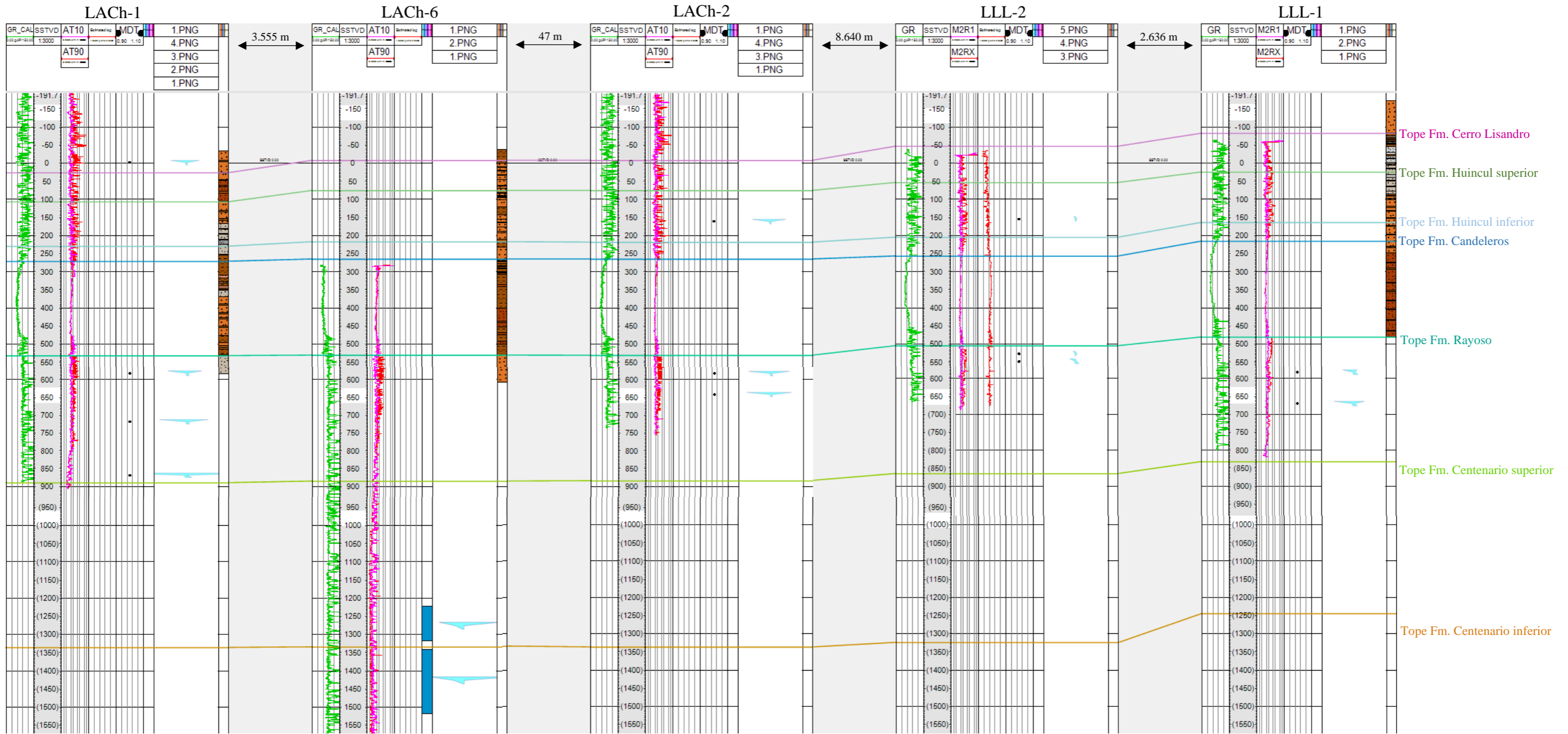


Figura 37. Transecta 6.

Pozo	Tipo de muestreo	Profundidad (tvdss)		Formación	Familia hidroquímica
		Desde	Hasta		
LCh-1	MDT	1,78	1,78	supra Fm. Cerro Lisandro	Clorurada Sódica
LCh-1	MDT	-582,72	-582,72	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LCh-1	MDT	-718,22	-718,22	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LCh-1	MDT	-869,22	-869,22	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LCh-2	MDT	-161,00	-161,00	Fm. Huincul superior	Clorurada Sódica
LCh-2	MDT	-582,14	-582,14	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LCh-2	MDT	-642,43	-642,43	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica
LCh-6	PISTONEO	-1223,24	-1317,74	Fm. Centenario superior	Clorurada Sódica
LCh-6	PISTONEO	-1340,74	-1518,74	Fm. Centenario inferior	Clorurada Sódica
LLL-2	RCI	-154,50	-154,50	Fm. Huincul superior	Bicarbonatada Sódica
LLL-2	RCI	-527,30	-527,30	Fm. Rayoso	Bicarbonatada Sódica
LLL-2	RCI	-548,10	-548,10	Fm. Rayoso	Sulfatada Sódica
LLL-1	RCI	-582,80	-582,80	Fm. Rayoso	Sulfatada-Clorurada Sódica
LLL-1	RCI	-669,80	-669,80	Fm. Rayoso	Clorurada Sódica

Tabla 10. Datos de las muestras de agua correspondientes a la transecta 6.

Todos los pozos que componen esta transecta fueron descritos en las secciones anteriores. Por lo tanto, haciendo un análisis en la lateral, hacia el sur de la transecta que correspondería al bloque Loma Campana, la familia hidroquímica de la Fm. Rayoso cambia de clorurada sódica a bicarbonatada sódica y sulfatada sódica, y culmina en el pozo LLL-1 como agua de mezcla (sulfatada-clorurada sódica) en el tope de la formación y clorurada sódica en la muestra más profunda (aunque con menos concentración de cloruros y sodio que el pozo LCh-1 y LCh-2). A su vez, en el miembro superior de la Fm. Huincul se observa un cambio de clorurada sódica a bicarbonatada sódica.

Todas las familias de aguas correspondientes a esta sección quedan representadas en la Figura 38.

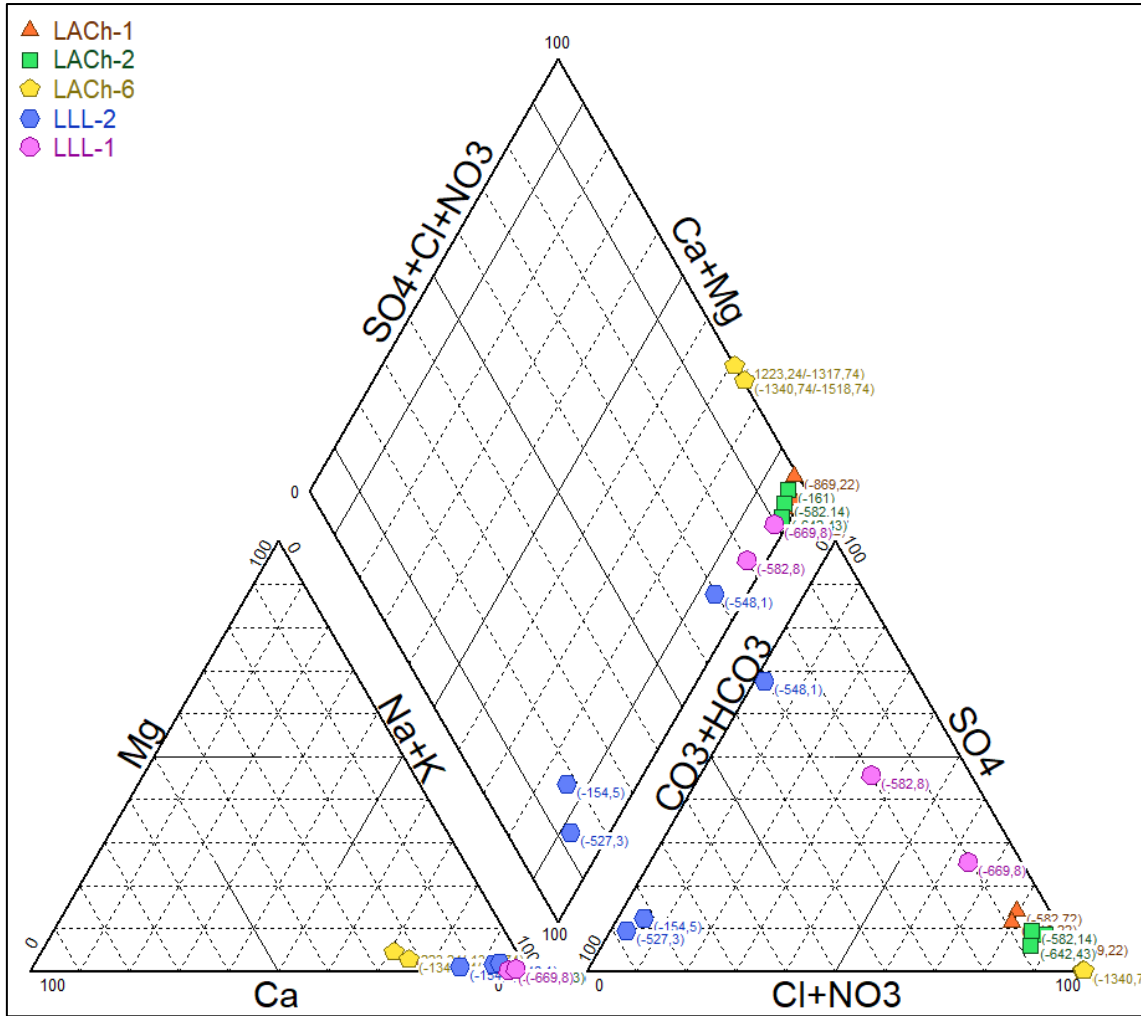


Figura 38. Diagrama de Piper para las muestras de agua de la transecta 6.

6.3 Clasificación de salinidad

6.3.1 Formación Centenario

Todas las muestras pertenecientes a la Fm. Centenario se clasifican como salmueras porque los valores se encuentran por encima de 100.000 mg/L (Tabla 11).

Pozo / Profundidad	Contenido STD [mg/L]	Tipo de agua
LLL-5_(-1002,2/-1213,2 mbnm)	102.397,97	Salmuera
LCav-3_(-1083,24/-1233,64 mbnm)	111.509,83	Salmuera
LLL-6_(-1110,3/-1283,8 mbnm)	131.226.56	Salmuera
LCav-4_(-1110,37/-1265,37 mbnm)	169.284.51	Salmuera
LACH-5_(-1110,54/-1280,54 mbnm)	178.280.01	Salmuera
LACH-6_(-1223,24/-1317,74 mbnm)	132.257,71	Salmuera
LCav-3_(-1265,94/-1451,24 mbnm)	159.279,72	Salmuera
LCav-4_(-1287,37/-1413,87 mbnm)	194.858.83	Salmuera
LACH-4_(-1295,59/-1688,59 mbnm)	177.336.3	Salmuera
LACH-5_(-1295,59/-1420,54 mbnm)	175.324.02	Salmuera
LLL-6_(-1317,3/-1452,3 mbnm)	203.397.56	Salmuera

LACH-6_(-1340,74/-1518,74 mbnm)	173.241,76	Salmuera
---------------------------------	------------	----------

Tabla 11. Clasificación del tipo de agua de las muestras de la Fm. Centenario.

6.3.2 Formación Rayoso

Para la Fm. Rayoso, 8 muestras se clasifican como salobres porque sus valores de STD se encuentran entre 1.000 y 10.000 mg/L y 7 muestras como saladas estando sus concentraciones de STD entre 10.000 y 100.000 mg/L (Tabla 12).

Pozo / Profundidad	Contenido STD [mg/L]	Tipo de agua
LLL-2_(-527,3 mbnm)	1.496,5	Salobre
LLL-2_(-548,1 mbnm)	3.528,3	Salobre
LLL-4_(-567,35 mbnm)	4.617,6	Salobre
LACH-3_(-581,67 mbnm)	6.189,62	Salobre
LACH-2_(-582,14 mbnm)	11.811,97	Salada
LACH-1_(-582,72 mbnm)	9.995,71	Salobre
LLL-1_(-582,8 mbnm)	5.436	Salobre
LCav-1_(-616,99 mbnm)	4.118	Salobre
LACH-2_(-642,43 mbnm)	12.379,79	Salada
LLL-1_(-669,8 mbnm)	10.410	Salada
LLL-4_(-676,19 mbnm)	4.796,14	Salobre
LACH-1_(-718,22 mbnm)	14.266,79	Salada
LCav-2_(-783,78 mbnm)	13.233,5	Salada
LCav-1_(-789,99 mbnm)	18.750	Salada
LACH-1_(-869,22 mbnm)	39.869,39	Salada

Tabla 12. Clasificación del tipo de agua de las muestras de la Fm. Rayoso.

6.3.3 Grupo Neuquén

El Gpo. Neuquén presenta 9 muestras de fluido, de las cuales, 2 se clasifican como dulces por presentar valores de STD menores a 1.000 mg/L, 6 salobres con valores entre 1.000 mg/L y 10.000 mg/L y una como salada la cual pertenece a la Fm. Candeleros y exhibe contenido de STD > 10.000 mg/L (Tabla 13).

Pozo / Profundidad	Formación	Contenido STD [mg/L]	Tipo de agua
LLL-5_(193,8 msnm)	supra Fm. Cerro Lisandro	1.96,85	Salobre
LACH-4_(156,41 msnm)	supra Fm. Cerro Lisandro	328,85	Dulce
LACH-4_(71,41 msnm)	supra Fm. Cerro Lisandro	414,08	Dulce
LACH-1_(1,78 msnm)	supra Fm. Cerro Lisandro	7.928,46	Salobre
LLL-5_(-145,6 mbnm)	Fm. Huincul inferior	3.670,15	Salobre
LLL-2_(-154,5 mbnm)	Fm. Huincul superior	1.275,2	Salobre
LACH-2_(-161 mbnm)	Fm. Huincul superior	9.328,25	Salobre
LACH-3_(-163,67 mbnm)	Fm. Huincul superior	3.109,57	Salobre
LLL-3_(-223,78 mbnm)	Fm. Candeleros	12.756,1	Salada

Tabla 13. Clasificación del tipo de agua de las muestras del Gpo. Neuquén.

6.4 Aptitud consumo humano

6.4.1 Formación Centenario

Todas las muestras pertenecientes a la Fm. Centenario se clasifican como no aptas para consumo humano por superar los límites permitidos y a su vez, por presentar elementos con tratamientos de alta complejidad como el boro, bario, cromo, flúor y nitratos (marcados con rojo) (Tabla 14).

Pozo / Profundidad	Toxicidad	Resultado
LLL-5_(-1002,2/-1213,2 mbnm)	pH, Boro , Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Detergentes, Hierro Total, Cromo Total , Cobre, Sulfatos, Flúor , Níquel, Plomo	No apta
LCav-3_(-1083,24/-1233,64 mbnm)	pH, Boro , Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Detergentes, Hierro Total, Cromo Total , Cobre, Flúor , Nitratos, Plomo	No apta
LLL-6_(-1110,3/-1283,8 mbnm)	pH, Boro , Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Detergentes, Hierro Total, Cromo Total , Flúor , Níquel	No apta
LCav-4_(-1110,37/-1265,37 mbnm)	pH, Boro , Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Hierro Total, Cromo Total , Sulfatos, Flúor	No apta
LACH-5_(-1110,54/-1280,54 mbnm)	pH, Boro , Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Detergentes, Hierro Total, Cromo Total , Flúor , Níquel	No apta
LACH-6_(-1223,24/-1317,74 mbnm)	pH, Boro , Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Detergentes, Hierro Total, Cromo Total , Cobre, Flúor , Zinc, Níquel, Plomo	No apta
LCav-3_(-1265,94/-1451,24 mbnm)	pH, Boro , Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Detergentes, Hierro Total, Cromo Total , Flúor , Nitratos , Plomo	No apta
LCav-4_(-1287,37/-1413,87 mbnm)	pH, Boro , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Hierro Total, Cromo Total , Flúor	No apta
LACH-4_(-1295,59/-1688,59 mbnm)	pH, Boro , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Detergentes, Hierro Total, Cobre, Flúor	No apta
LACH-5_(-1295,59/-1420,54 mbnm)	pH, Boro , Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Detergentes, Hierro Total, Cromo Total , Flúor , Níquel	No apta
LLL-6_(-1317,3/-1452,3 mbnm)	pH, Boro , Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Hierro Total	No apta
LACH-6_(-1340,74/-1518,74 mbnm)	pH, Boro , Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Detergentes, Hierro Total, Cromo Total , Cobre, Sulfatos, Flúor , Zinc, Níquel, Plomo	No apta

Tabla 14. Clasificación de aptitud para consumo humano de las muestras pertenecientes a la Fm. Centenario.

6.4.2 Formación Rayoso

La totalidad de las muestras que representan a esta formación son no aptas para consumo humano por no cumplir con los límites permitidos de ciertos elementos que a su vez presentan tratamientos de alta complejidad (marcados con rojo). En este caso, se reduce la cantidad de elementos superados respecto a la Fm. Centenario (Tabla 15).

Pozo / Profundidad	Toxicidad	Resultado
LLL-2_(-527,3 mbnm)	Boro, Detergentes.	No apta
LLL-2_(-548,1 mbnm)	Boro, Manganeso, Sólidos Disueltos Totales, Detergentes, Sulfatos, Sulfatos	No apta
LLL-4_(-567,35 mbnm)	Boro, Bario, Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Detergentes, Hierro Total, Sulfatos	No apta
LACH-3_(-581,67 mbnm)	Boro, Bario, Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Flúor, Níquel	No apta
LACH-2_(-582,14 mbnm)	Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Hierro, Sulfatos, Flúor	No apta
LACH-1_(-582,72 mbnm)	Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Hierro, Sulfatos, Flúor	No apta
LLL-1_(-582,8 mbnm)	Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Hierro, Sulfatos, Detergentes, Flúor, Nitritos	No apta
LCav-1_(-616,99 mbnm)	Boro, Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Cadmio, Sulfatos, Flúor.	No apta
LACH-2_(-642,43 mbnm)	Boro, Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Hierro, Sulfatos, Flúor	No apta
LLL-1_(-669,8 mbnm)	Boro, Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Detergentes, Sulfatos, Flúor	No apta
LLL-4_(-676,19 mbnm)	Boro, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Detergentes, Hierro Total, Sulfatos	No apta
LACH-1_(-718,22 mbnm)	Boro, Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Hierro Total, Cromo Total, Sulfatos, Flúor, Níquel	No apta
LCav-2_(-783,78 mbnm)	Boro, Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Cadmio	No apta
LCav-1_(-789,99 mbnm)	Boro, Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Sulfatos, Flúor	No apta
LACH-1_(-869,22 mbnm)	Boro, Bario, Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Detergentes, Hierro Total, Cromo Total, Sulfatos, Flúor, Níquel	No apta

Tabla 15. Clasificación de aptitud para consumo humano de las muestras pertenecientes a la Fm. Rayoso.

6.4.3 Grupo Neuquén

Para el Gpo. Neuquén la totalidad de las muestras se clasifican como no aptas para consumo humano. Respecto a los elementos tóxicos que presentan tratamientos de alta complejidad son en su mayoría boro, bario y flúor (Tabla 16).

Pozo / Profundidad	Toxicidad	Resultado
LLL-5_(193,8 msnm)	Bario, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Detergentes, Sulfatos	No apta
LACH-4_(156,41 msnm)	Flúor	No apta
LACH-4_(71,41 msnm)	Flúor	No apta

LACH-1_(1,78 msnm)	pH, Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Hierro Total, Cadmio , Sulfatos, Nitritos	No apta
LLL-5_(-145,6 mbnm)	Boro, Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Hierro Total, Sulfatos, Flúor	No apta
LLL-2_(-154,5 mbnm)	Boro , Manganeso, Detergentes, Hierro Total	No apta
LACH-2_(-161 mbnm)	Cloruros, Solidos Totales Disueltos, Hierro Total, Sulfatos, Flúor	No apta
LACH-3_(-163,67 mbnm)	Boro, Bario , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Flúor , Níquel	No apta
LLL-3_(-223,78 mbnm)	Boro , Cloruros, Manganeso, Sólidos Totales Disueltos, Dureza Total, Hierro Total, Detergentes, Flúor	No apta

Tabla 16. Clasificación de aptitud para consumo humano de las muestras pertenecientes al Gpo. Neuquén.

6.5 Aptitud riego

En el gráfico de Riverside se plotearon todas las muestras de las unidades geológicas de interés. Para el caso de la Fm. Centenario todas se encuentran por fuera del gráfico por presentar valores de conductividad mayores a 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una RAS muy elevada (>30). Para la Fm. Rayoso y Gpo. Neuquén algunas de sus muestras se sitúan fuera del gráfico al igual que en la Fm. Centenario, pero en otras es posible su clasificación (Figura 39)

A su vez, con la tabla 5 del Decreto 831/93 de la Ley N° 24.051 “Residuos Peligrosos” se determinaron los constituyentes tóxicos de cada unidad y la aptitud de estas. Para el caso de la Fm. Centenario los elementos tóxicos más presentes son boro, manganeso, hierro total, cromo total y flúor dando como resultado la no aptitud en dicha formación (Tabla 17). En la Fm. Rayoso todas las muestras son no aptas y los elementos tóxicos más comunes son boro y flúor (Tabla 18). Por último, en el Gpo. Neuquén los constituyentes tóxicos más comunes coinciden con los de la Fm. Rayoso, pero no en todas las muestras, la muestra LACH-4_(156,41 msnm) y LACH-4_(71,41 msnm) se clasifican como aptas para riego con precauciones por estar situadas en el rango de las clases C1 y C4 y por no superar los límites de los elementos tóxicos permitidos (Tabla 19).

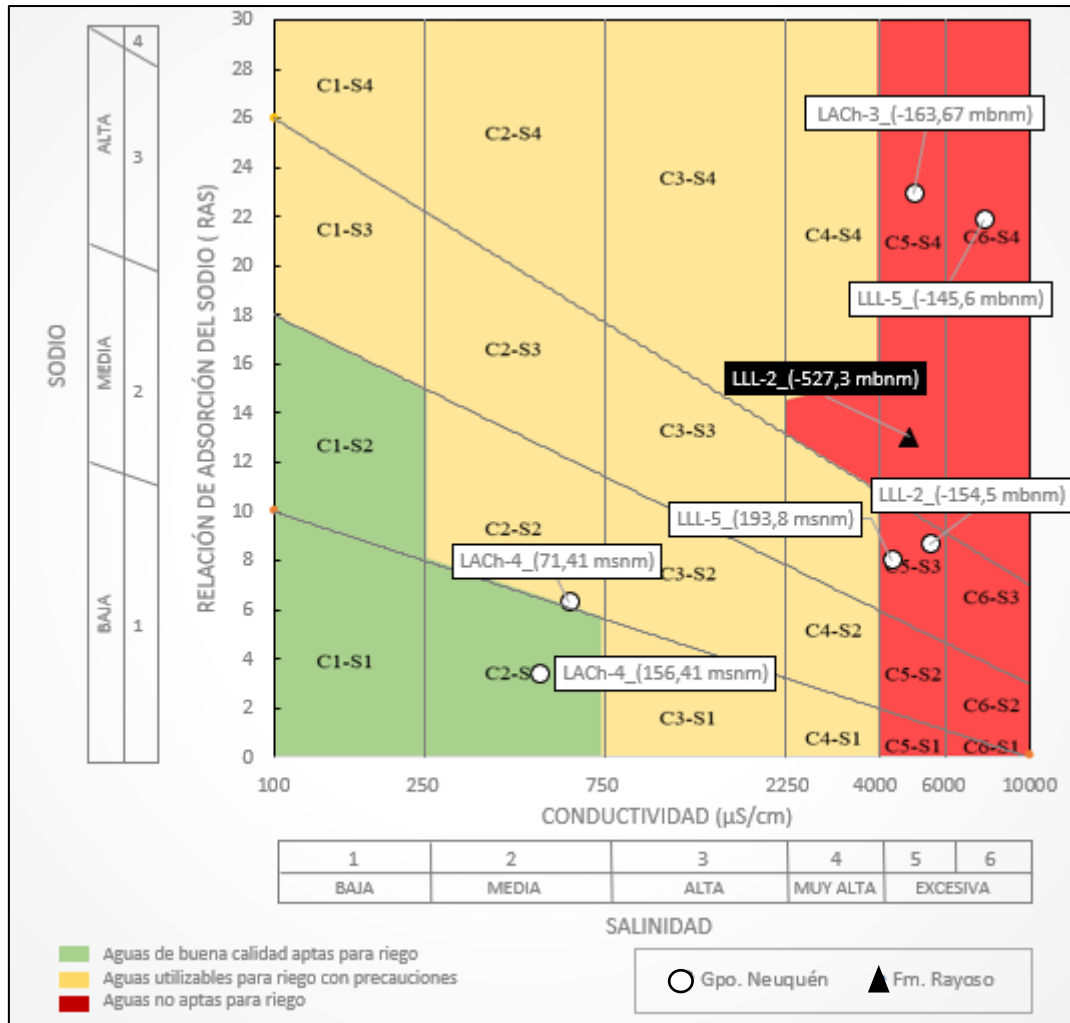


Figura 39. Gráfico de Riverside para las muestras pertenecientes a Gpo. Neuquén y la Fm. Rayoso.

Pozo Profundidad	RAS	CE 25°C [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Clasificación según gráfico Riverside	Toxicidad	Resultado
LLL-5_(-1002,2/-1213,2 mbnm)	109	134400	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total, Cromo Total, Cobre, Flúor, Níquel, Plomo	No apta
LCav-3_(-1083,24/-1233,64 mbnm)	60	171000	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total, Cromo Total, Cobre, Flúor, Zinc, Plomo	No apta
LLL-6_(-1110,3/-1283,8 mbnm)	85	211800	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total	No apta
LCav-4_(-1110,37/-1265,37 mbnm)	108	260000	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total	No apta

LACH-5_(-1110,54/-1280,54 mbnm)	131	218200	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total, Cromo Total, Flúor, Níquel	No apta
LACH-6_(-1223,24/-1317,74 mbnm)	85	194100	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total, Cromo Total, Cobre, Flúor, Zinc, Níquel, Plomo	No apta
LCav-3_(-1265,94/-1451,24 mbnm)	103	225300	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total, Cromo Total, Flúor, Zinc, Plomo	No apta
LCav-4_(-1287,37/-1413,87 mbnm)	80	284400	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total, Cromo	No apta
LACH-4_(-1295,59/-1688,59 mbnm)	99	235000	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso	No apta
LACH-5_(-1295,59/-1420,54 mbnm)	41	224400	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total, Cromo Total, Flúor, Níquel	No apta
LLL-6_(-1317,3/-1452,3 mbnm)	166	264000	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total	No apta
LACH-6_(-1340,74/-1518,74 mbnm)	110	265200	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Hierro Total, Cromo Total, Cobre, Flúor, Zinc, Níquel, Plomo	No apta

Tabla 17. Aptitud para riego de las muestras de agua de la Fm. Centenario.

Pozo Profundidad	RAS	C 25°C [μS/cm]	Clasificación según gráfico Riverside	Toxicidad	Resultado
LLL-2_(-527,3 mbnm)	13,0	4810	C5-S4	Boro, Flúor	No apta
LLL-2_(-548,1 mbnm)	30,2	10020	Fuera del gráfico	Boro, Flúor	No apta
LLL-4_(-567,35 mbnm)	42,7	7530	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Flúor	No apta
LACH-3_(-581,67 mbnm)	39,2	9725,5	Fuera del gráfico	Boro, Flúor, Níquel	No apta
LACH-2_(-582,14 mbnm)	74,8	8260	Fuera del gráfico	Flúor	No apta
LACH-1_(-582,72 mbnm)	89,9	8120	Fuera del gráfico	Flúor	No apta
LLL-1_(-582,8 mbnm)	51,6	7180	Fuera del gráfico	Flúor	No apta
LCav-1_(-616,99 mbnm)	34,6	5820	Fuera del gráfico	Boro	No apta
LACH-2_(-642,43 mbnm)	118,9	8090	Fuera del gráfico	Boro, Flúor	No apta

LLL-1_(-669,8 mbnm)	91,1	14800	Fuera del gráfico	Boro, Flúor	No apta
LLL-4_(-676,19 mbnm)	55,1	7360	Fuera del gráfico	Boro, Flúor	No apta
LACH-1_(-718,22 mbnm)	127,2	15720	Fuera del gráfico	Boro, Flúor, Níquel	No apta
LCav-2_(-783,78 mbnm)	115,3	18530	Fuera del gráfico	Boro, Cadmio, Flúor	No apta
LCav-1_(-789,99 mbnm)	115,6	24600	Fuera del gráfico	Boro	No apta
LACH-1_(-869,22 mbnm)	147,8	57300	Fuera del gráfico	Boro, Cromo, Flúor, Níquel	No apta

Tabla 18. Aptitud para riego de las muestras de agua de la Fm. Rayoso.

Pozo Profundidad	RAS	C 25°C [μS/cm]	Clasificación según gráfico Riverside	Toxicidad	Resultado
LLL-5_(193,8 msnm)	8,05	4300	C5-S3	Flúor	No apta
LACH-4_(156,41 msnm)	3,42	503	C2-S1	-	Utilizable con precauciones
LACH-4_(71,41 msnm)	6,34	601	C2-S2	-	Utilizable con precauciones
LACH-1_(1,78 msnm)	92,62	2780	Fuera del gráfico	Cadmio, Flúor	No apta
LLL-5_(-145,6 mbnm)	21,86	7580	C6-S4	Boro, Manganeso, Flúor	No apta
LLL-2_(-154,5 mbnm)	8,62	5430	C5-S3	Boro, Flúor	No apta
LACH-2_(-161 mbnm)	62,15	5430	Fuera del gráfico	Flúor	No apta
LACH-3_(-163,67 mbnm)	22,92	4921	C5-S4	Boro, Manganeso, Cobalto, Flúor, Níquel	No apta
LLL-3_(-223,78 mbnm)	27,83	33200	Fuera del gráfico	Boro, Manganeso, Cobre	No apta

Tabla 19. Aptitud para riego de las muestras de agua del Gpo. Neuquén.

6.6 Análisis hidroquímico según unidades geológicas

6.6.1 Formación Centenario

Las 12 muestras de fluido pertenecientes a la Fm. Centenario exhiben una familia hidroquímica clorurada sódica con excepción de la muestra LACH-5_(-1295,59/-1420,54 mbnm) la cual es clorurada cálcica. Por lo tanto, el 92% corresponde a clorurada sódica y el 8% a clorurada cálcica (Figura 40, Figura 41 y Figura 42).

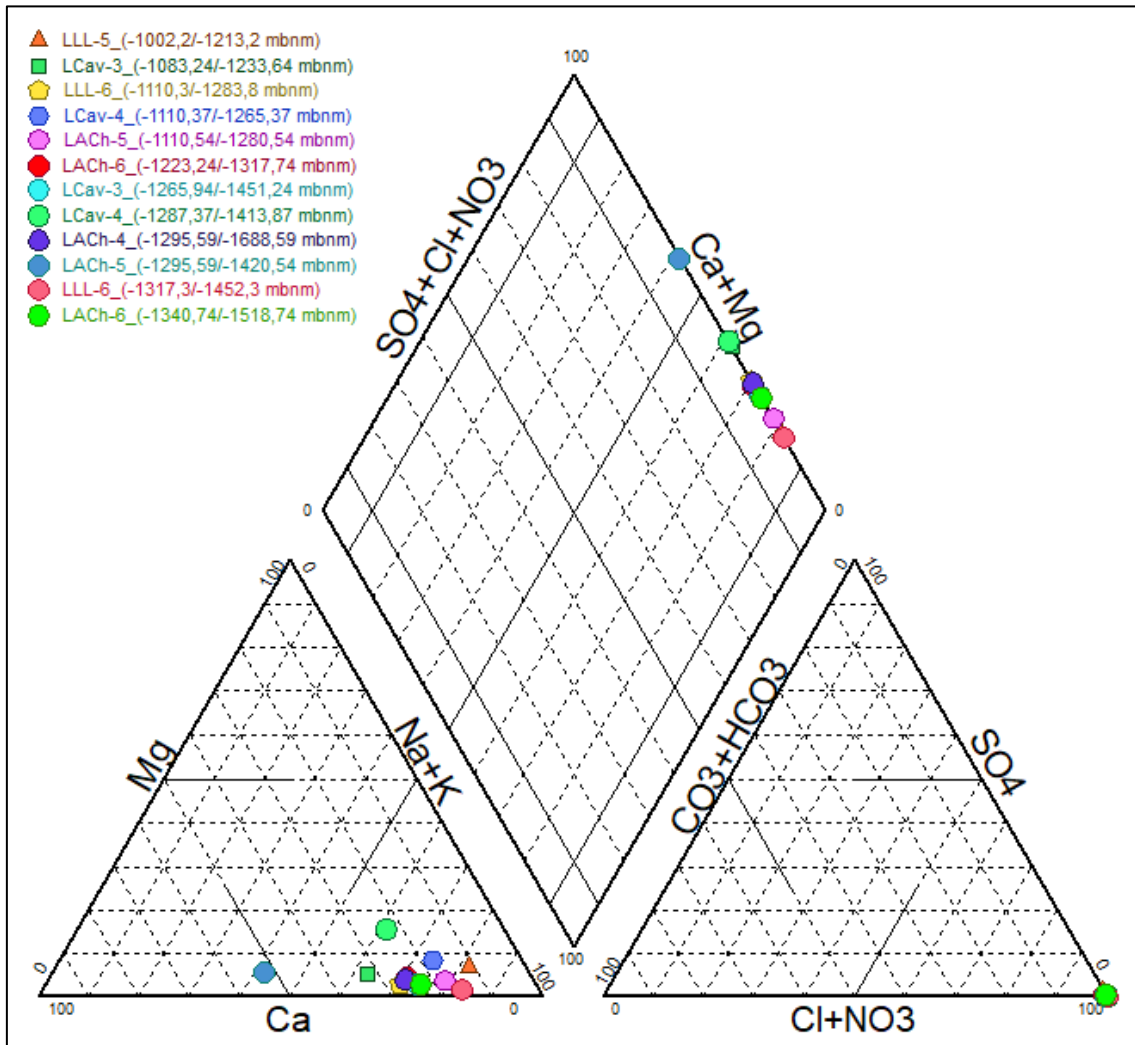


Figura 40. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la Fm. Centenario.

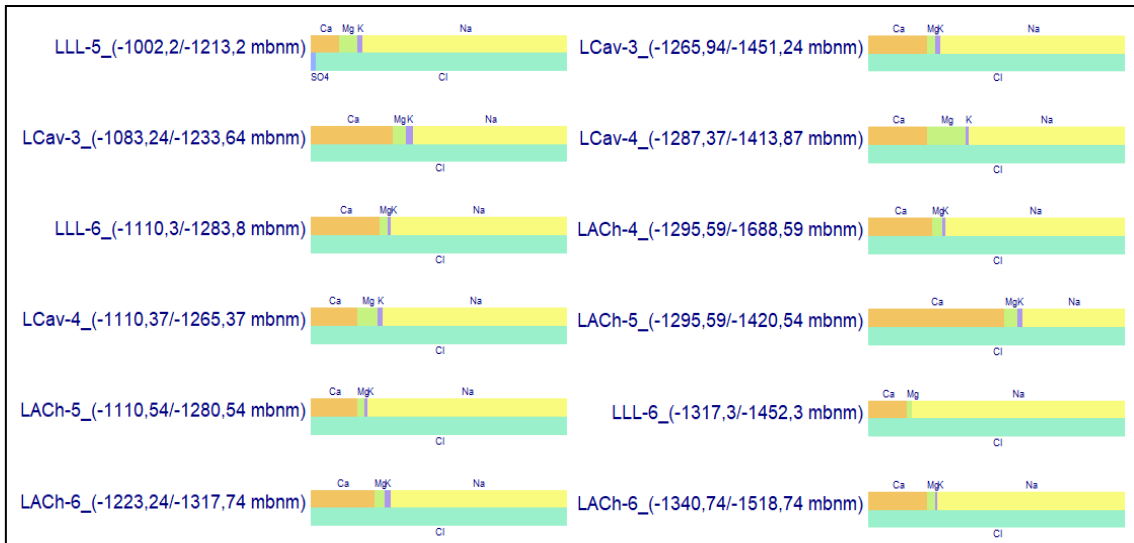


Figura 41. Diagramas de Stabler para las muestras de agua de la Fm. Centenario.

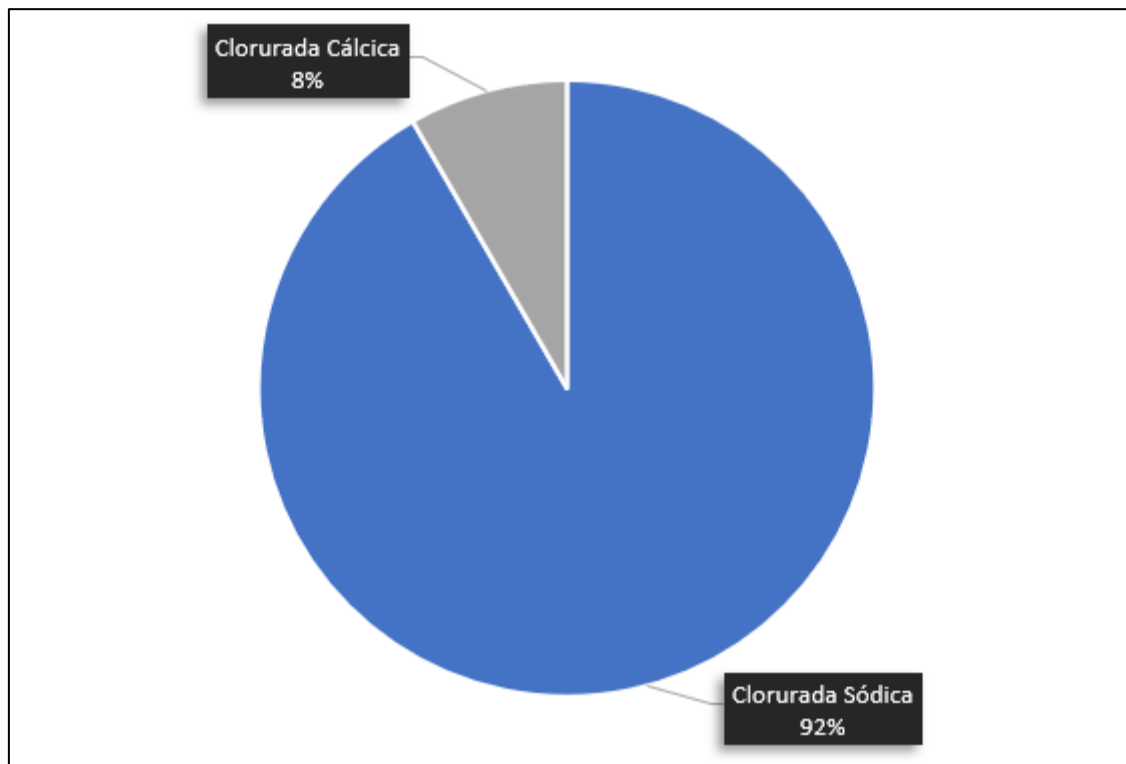


Figura 42. Distribución de las familias de agua de la Fm. Centenario.

6.6.2 Formación Rayoso

La Fm. Rayoso presenta 15 muestras de fluido. 8 de las mismas se clasifican como cloruradas sódica (53%), 3 como sulfatadas sódica (20%), 2 como bicarbonatadas sódicas (13%), 1 como agua de mezcla, clorurada-sulfatada sódica (7%) y 1 también de mezcla, pero sulfatada-clorurada sódica (7%) (Figura 43, Figura 44 y Figura 45).

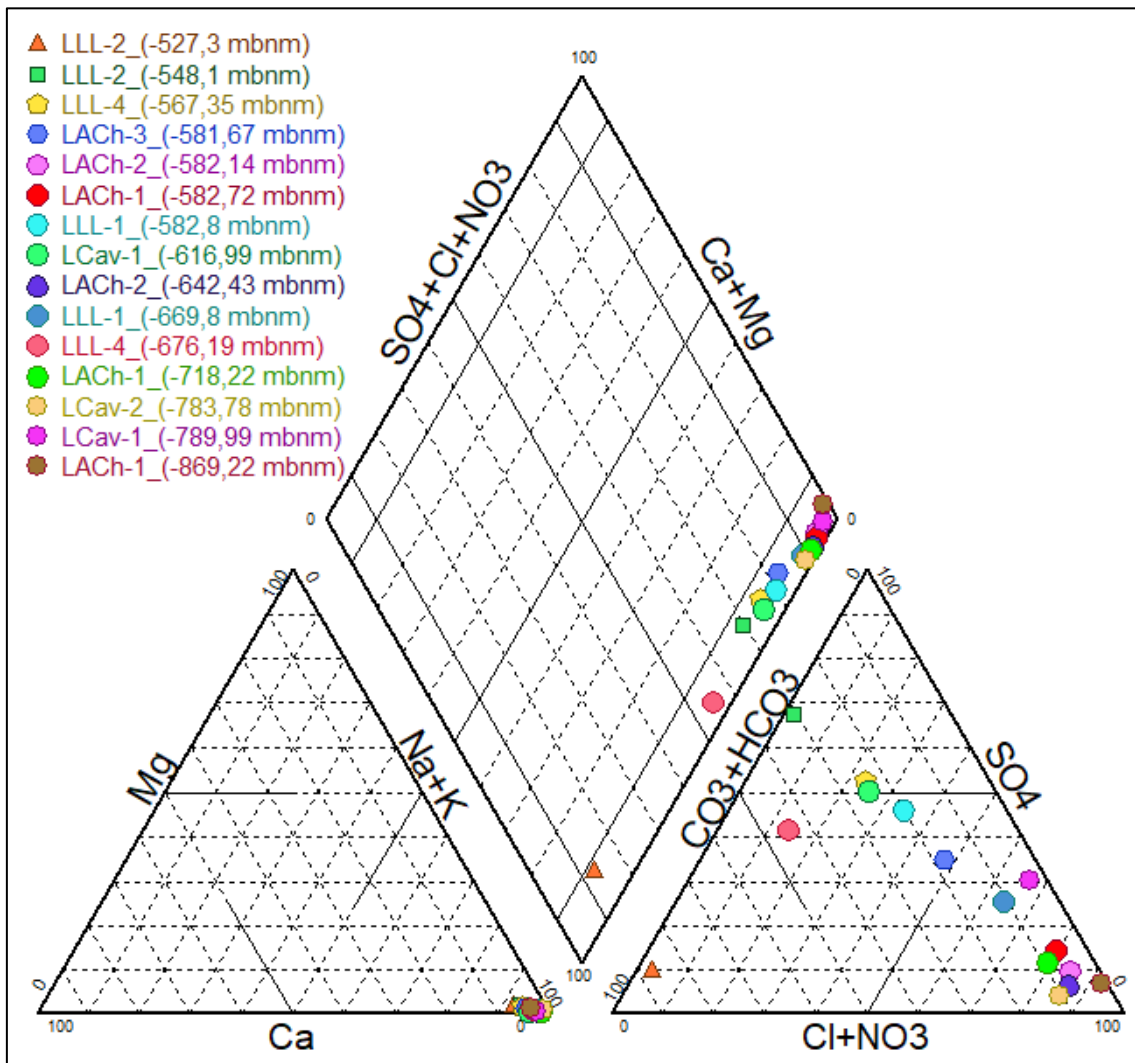


Figura 43. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la Fm. Rayoso.

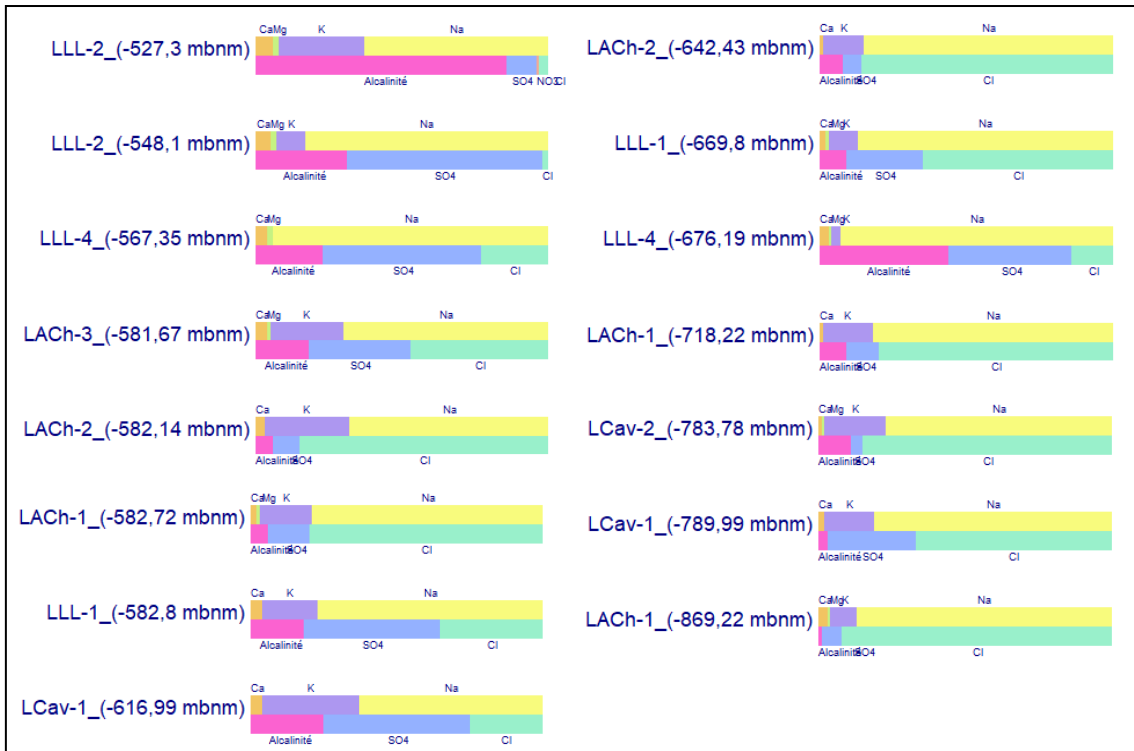


Figura 44. Diagramas de Stabler para las muestras pertenecientes a la Fm. Rayoso.

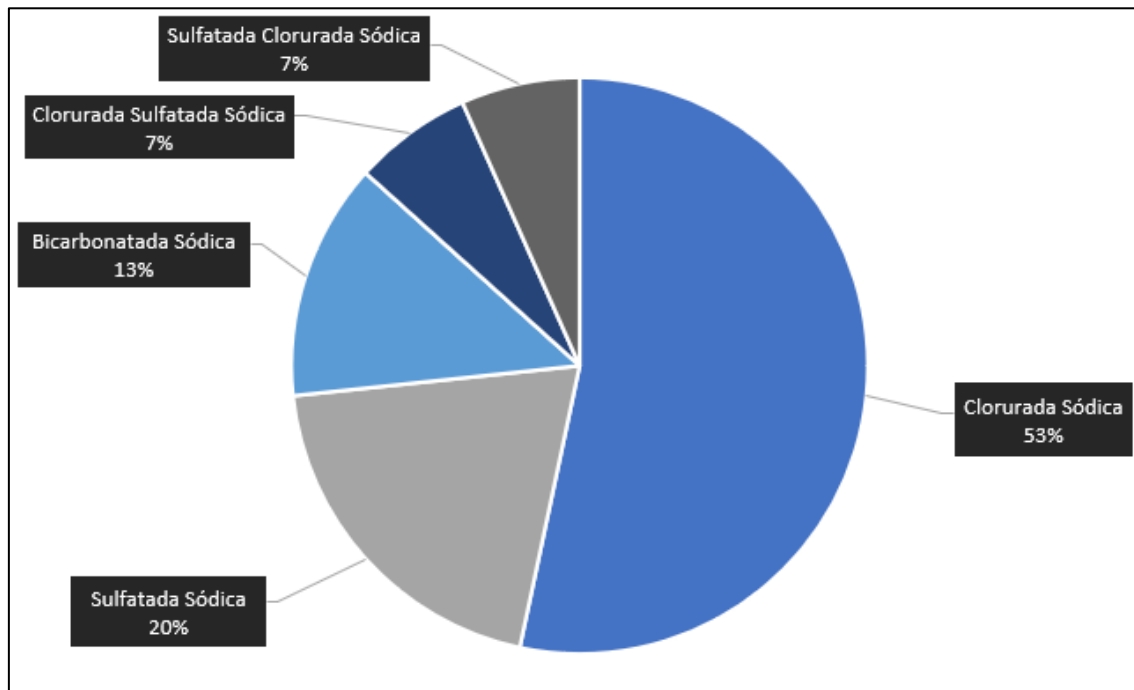


Figura 45. Distribución de las familias de aguas de la Fm. Rayoso.

6.6.3 Grupo Neuquén

De las 9 muestras pertenecientes al Gpo. Neuquén 3 de ellas presentan una familia hidroquímica sulfatada sódica (34%), 3 clorurada sódica (33%) y las últimas 3 restantes bicarbonatada sódica (33%) (Figura 46, Figura 47 y Figura 48).

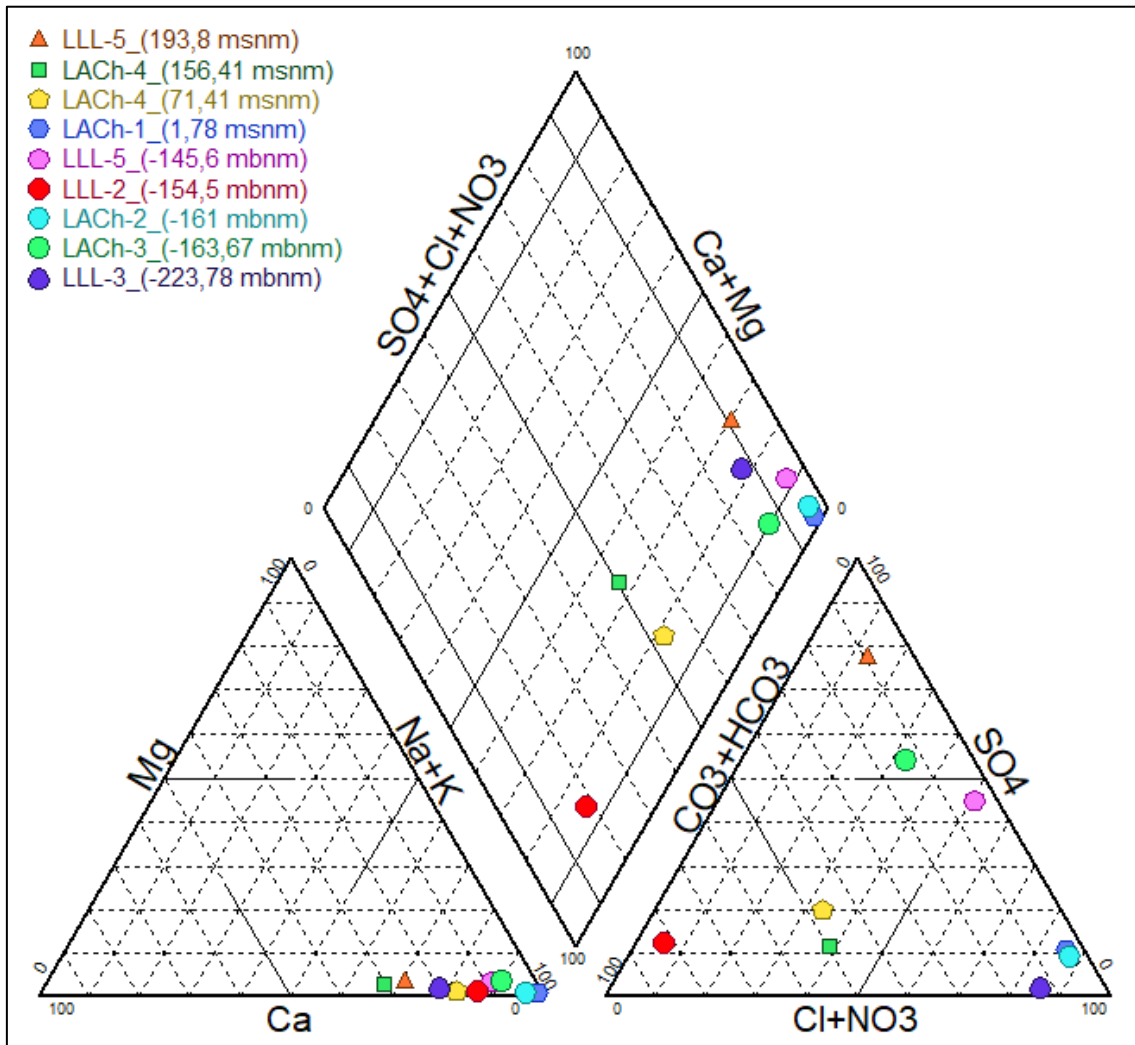


Figura 46. Diagrama de Piper de las muestras de agua del Gpo. Neuquén.

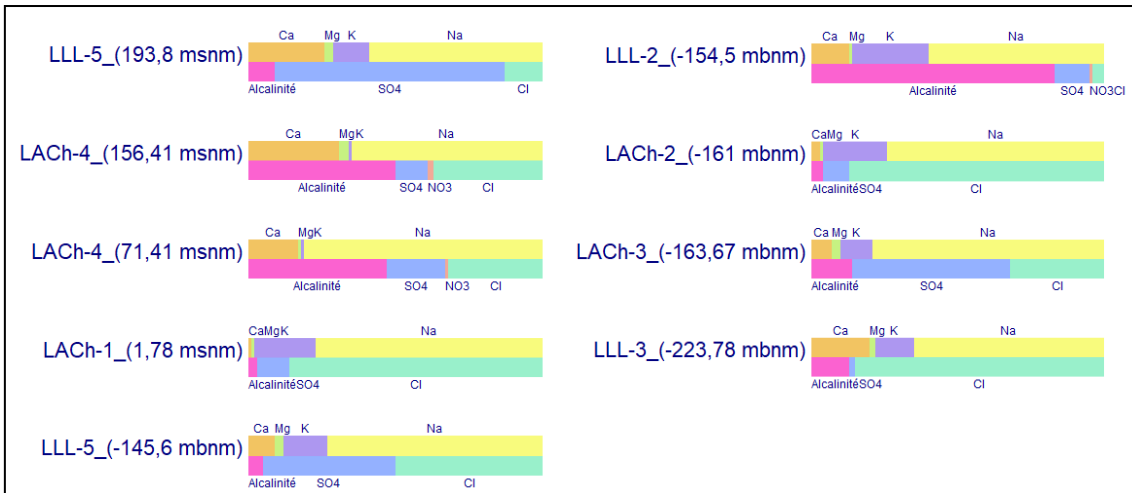


Figura 47. Diagramas de Stabler para las muestras pertenecientes al Gpo. Neuquén.

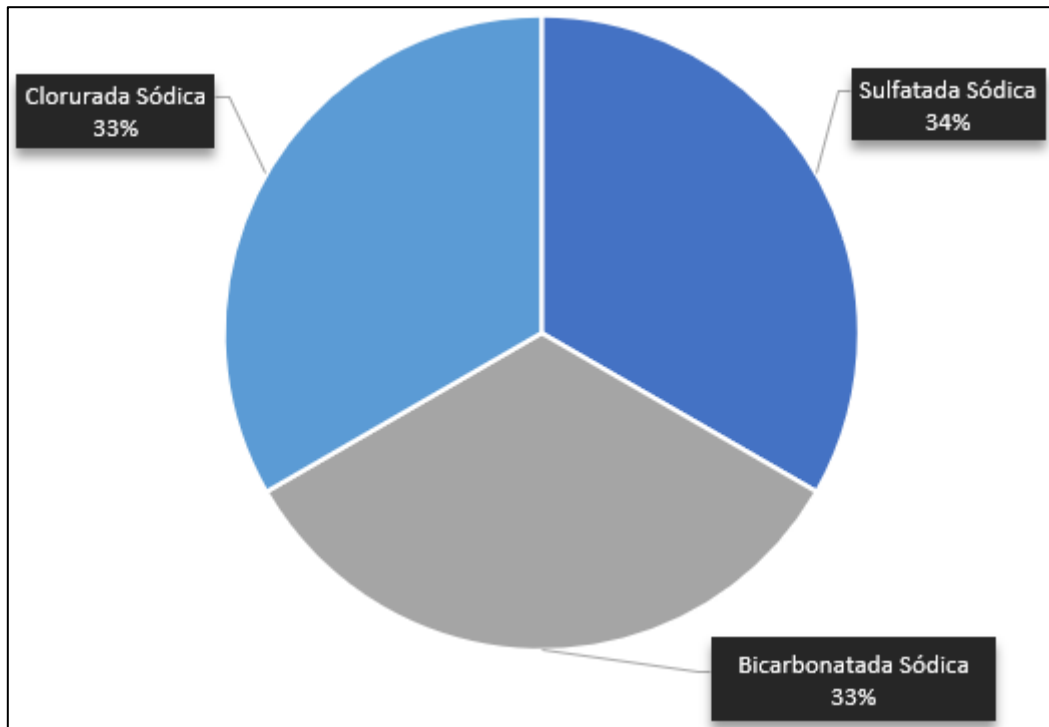


Figura 48. Distribución de las familias de agua en el Gpo. Neuquén.

6.7 Mapas isopáquicos

En el área de estudio, gracias a los topes formacionales que se determinaron anteriormente se pudieron estimar los espesores de la Fm. Centenario, Fm. Rayoso, Fm. Candeleros, Fm. Huincul inferior, Fm. Huincul superior y Fm. Cerro Lisandro que fueron plasmados en diferentes mapas evidenciando las variaciones en el área de este trabajo (Figura 49).

La Fm. Centenario presenta un espesor que se encuentra en un rango de 1.136 m a 1.296 m. Los espesores más bajos se encuentran en la región SO del área, los valores intermedios en el NO y los más altos en el E, situándose el de mayor espesor en el sur del bloque La Amarga Chica.

Por otra parte, la Fm. Rayoso exhibe menor espesor, el cual varía entre 344 m hasta 416 m. Los espesores más grandes se sitúan al N del bloque La Amarga Chica y al SO de Loma Campana, mientras que los espesores más bajos se encuentran en el extremo SE del bloque Bandurria.

Respecto a la Fm. Candeleros se obtuvieron espesores entre 236 m y 272 m. Si bien la diferencia de espesor no es significativa, los mayores valores se encuentran en S de La Amarga Chica y en el S de Loma Campana.

El mapa de espesor del miembro inferior de la Fm. Huincul refleja un rango que varía entre 33 m y 54 m. Por otro lado, el rango del miembro superior presenta valores mayores entre 120 m y 162 m. Si bien la distribución de los espesores en ambos miembros no exhibe una misma tendencia, el intervalo de variación es bajo en el área de estudio. Se podría inferir que el espesor de toda la formación se encuentra entre 153 m y 216 m.

Por último, la Fm. Cerro Lisandro refleja espesores que varían entre 60 m a 108 m. Los valores más altos se encuentran al S y al N del área, mientras que los valores bajos predominan en el NE.

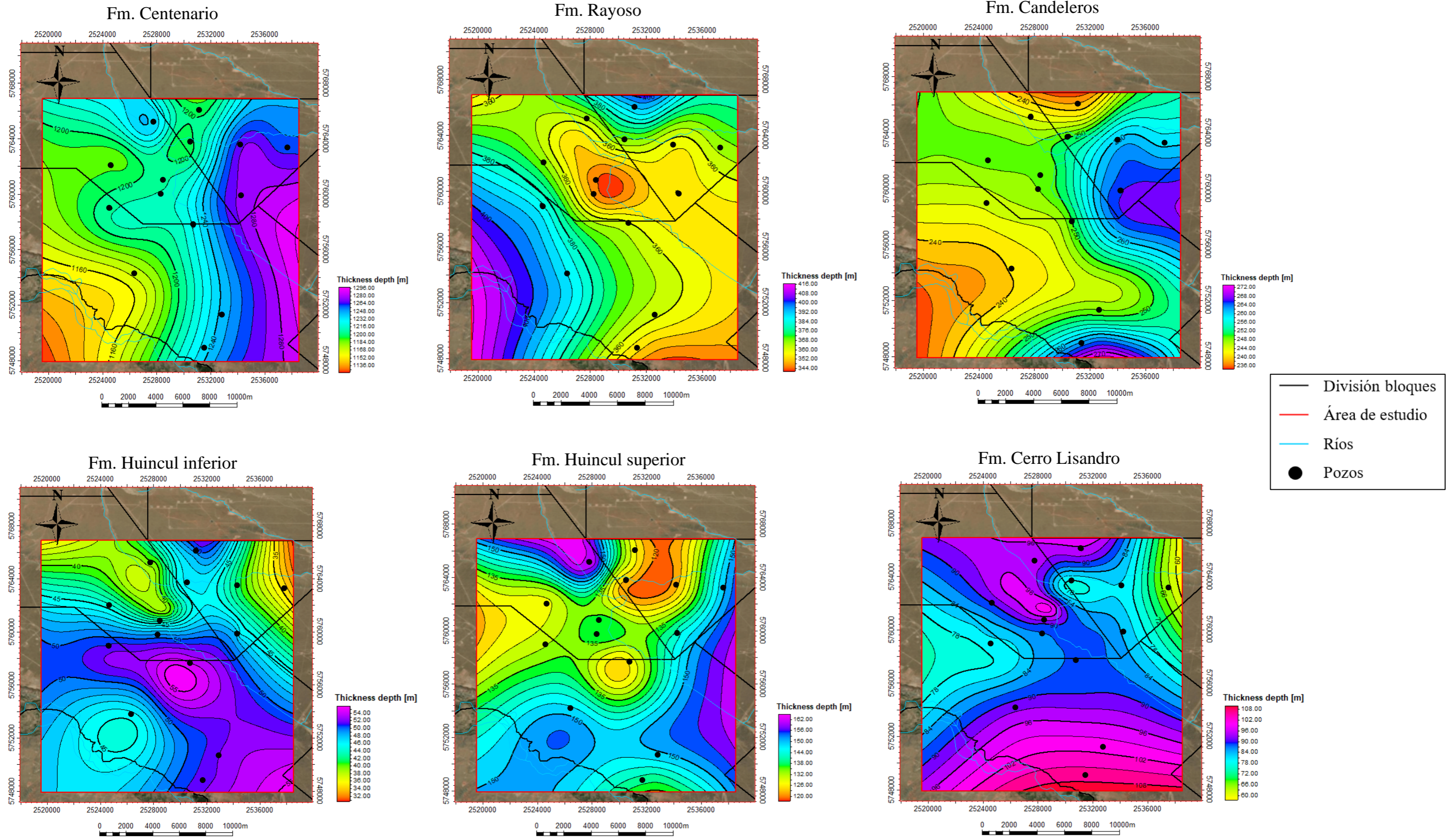


Figura 49. Mapas isopáquicos de las formaciones Centenario, Rayoso, Candeleros, Huincul inferior, Huincul superior y Cerro Lisandro.

6.8 Mapas estructurales

A partir de todos los mapas estructurales e isopáquicos generados, se concluye que, no se observan variaciones de espesor en las formaciones Centenario y Rayoso que evidencien actividad tectónica intensa durante su depositación. Por encima de la discordancia Intrasenoniana el buzamiento continua hacia el E indicando la continuidad de la estabilidad tectónica en este área de estudio.

Dichas unidades geológicas corresponden a capas homoclinales buzantes hacia el E con sus valores más someros situados en el O del área de estudio y sus valores más profundos en el E. En el caso del miembro inferior de la Fm. Centenario, varia de -1.170 m hasta -1380 m (Figura 52), el miembro superior desde -750 m a -930 m (Figura 51), la Fm. Rayoso de -330 m a -570 m (Figura 50) y la Fm. Candeleros de -100 m a -300 m (Figura 53). En cuanto al miembro inferior de la Fm. Huincul la zona más somera se encuentra en -50 m y la más profunda en -270 m (Figura 55), el miembro superior varia de 50 m a -120 m (Figura 54) y, por último, en la Fm. Cerro Lisandro la zona más somera se encuentra en 180 m y la más profunda en -60 m (Figura 56).

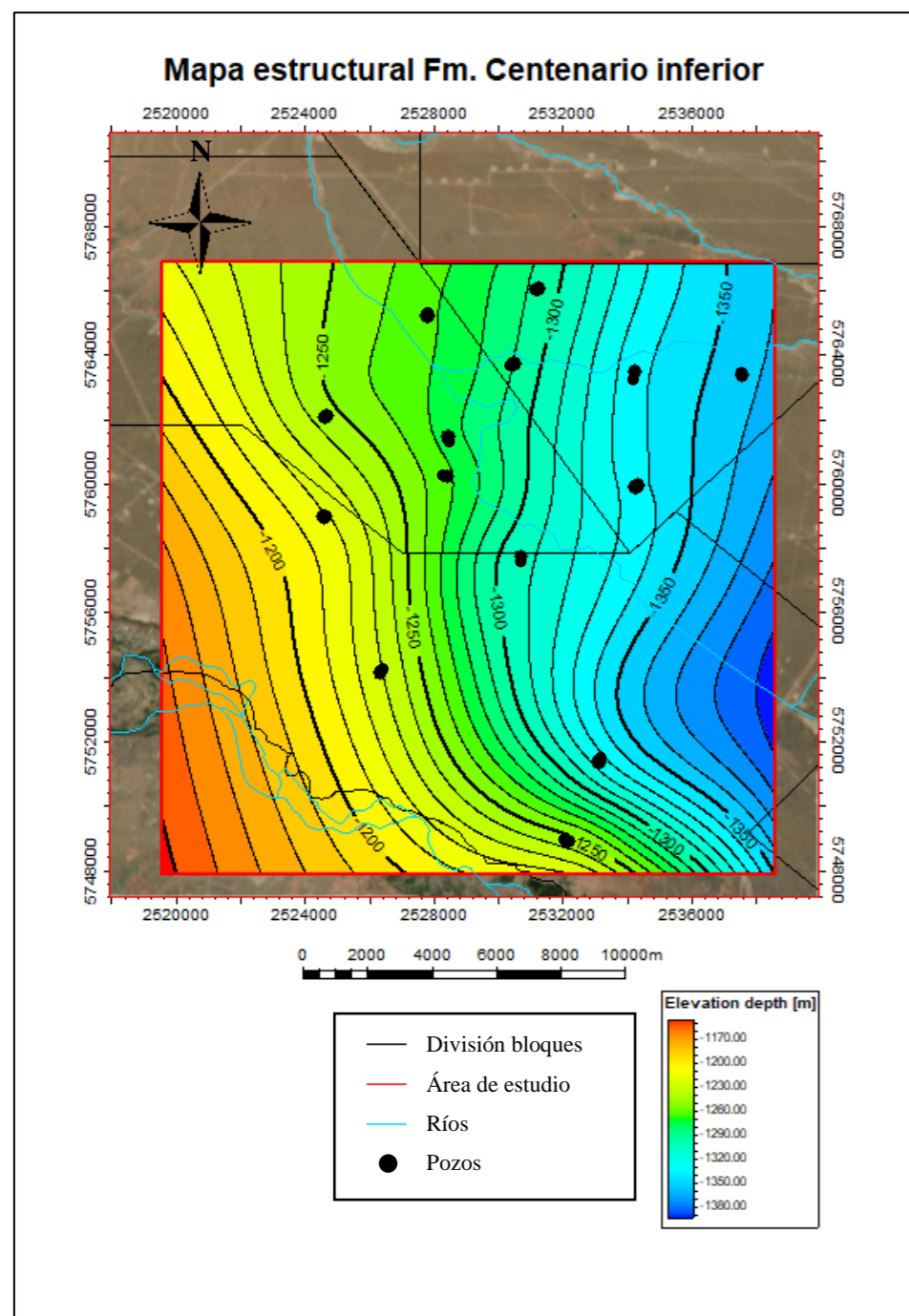


Figura 52. Mapa estructural al tope del miembro inferior de la Fm. Centenario.

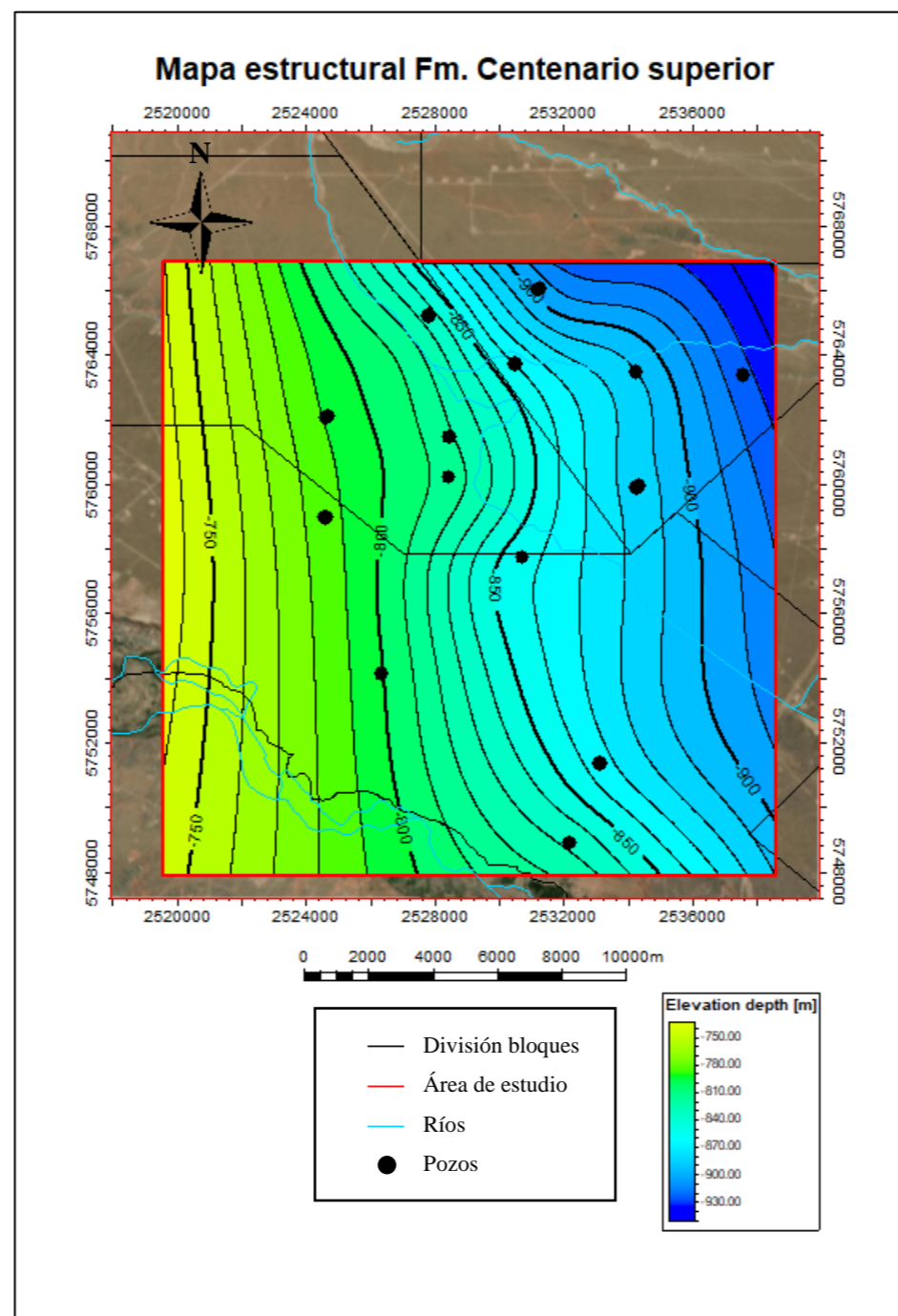


Figura 51. Mapa estructural al tope del miembro superior de la Fm. Centenario.

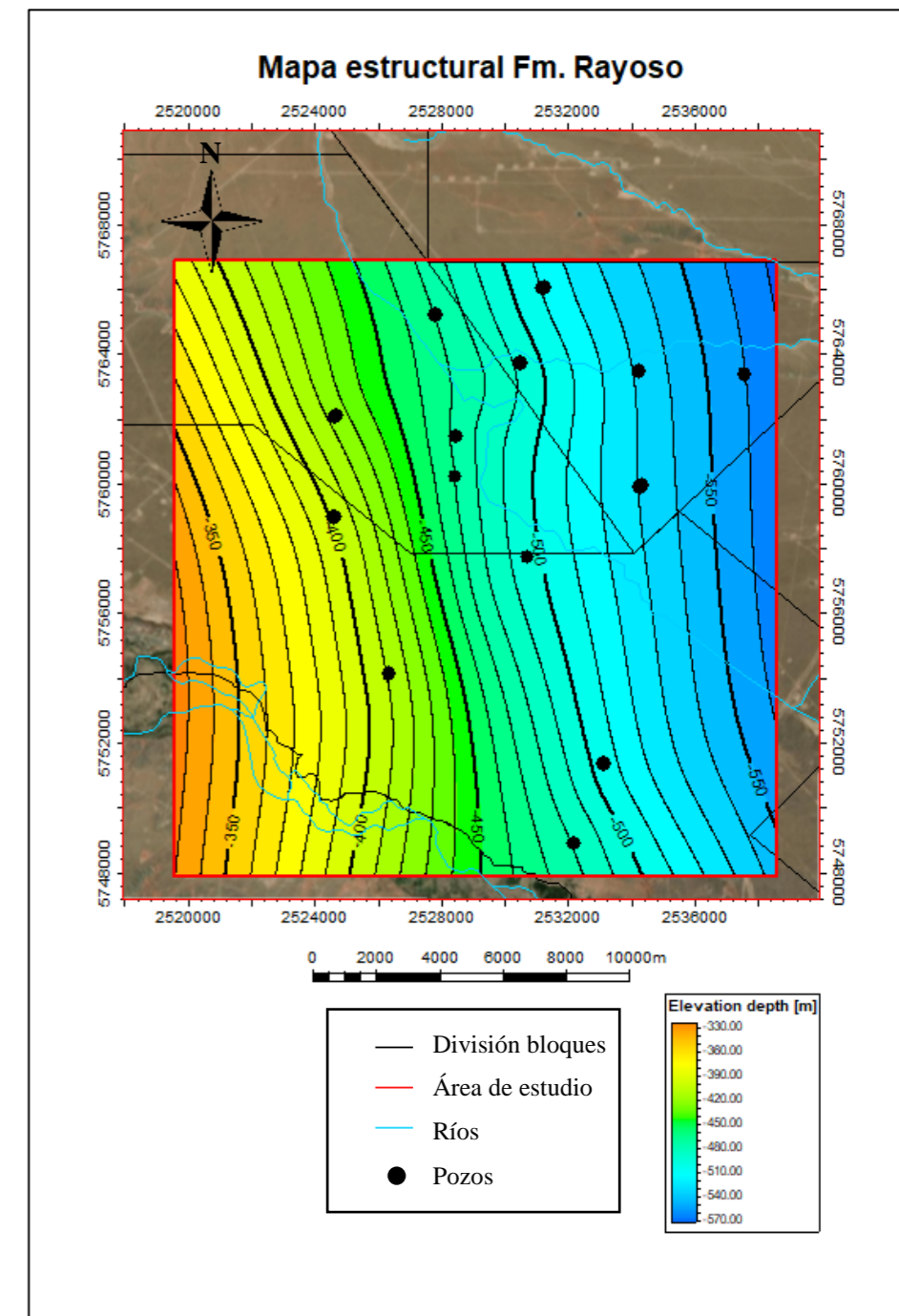


Figura 50. Mapa estructural al tope de la Fm. Rayoso.

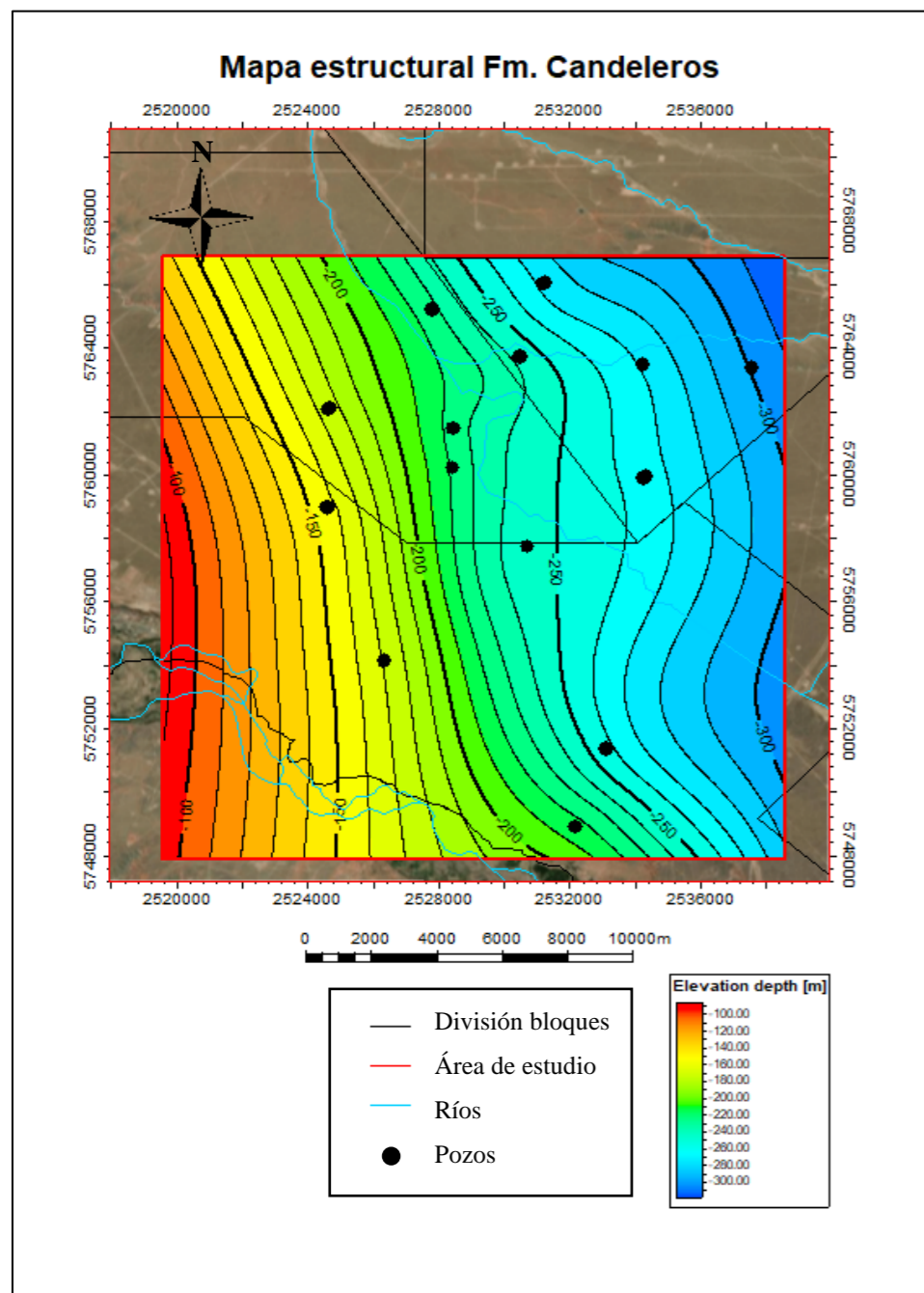


Figura 53. Mapa estructural al tope de la Fm. Candeleros.

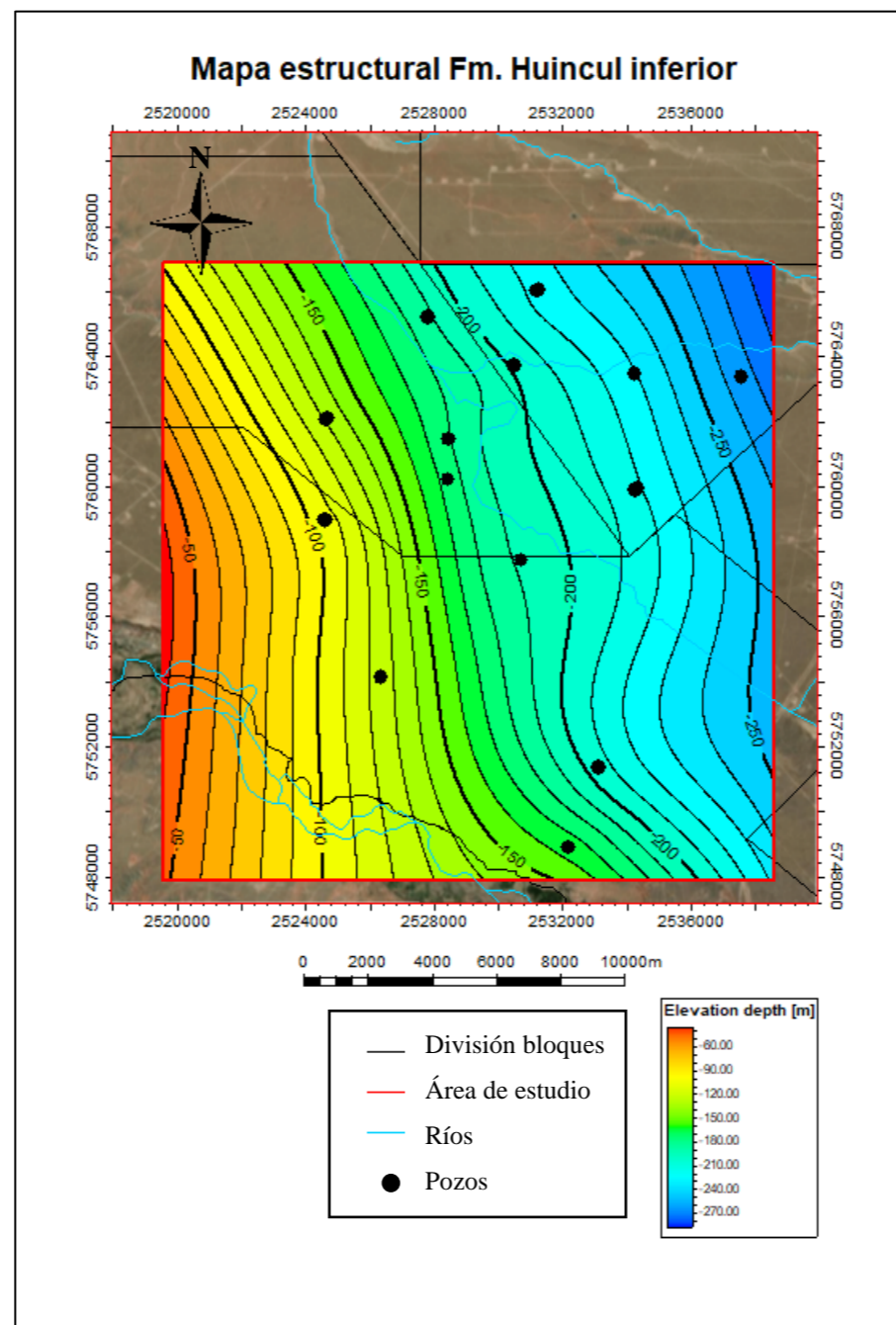


Figura 55. Mapa estructural al tope del miembro inferior de la Fm. Huincul.

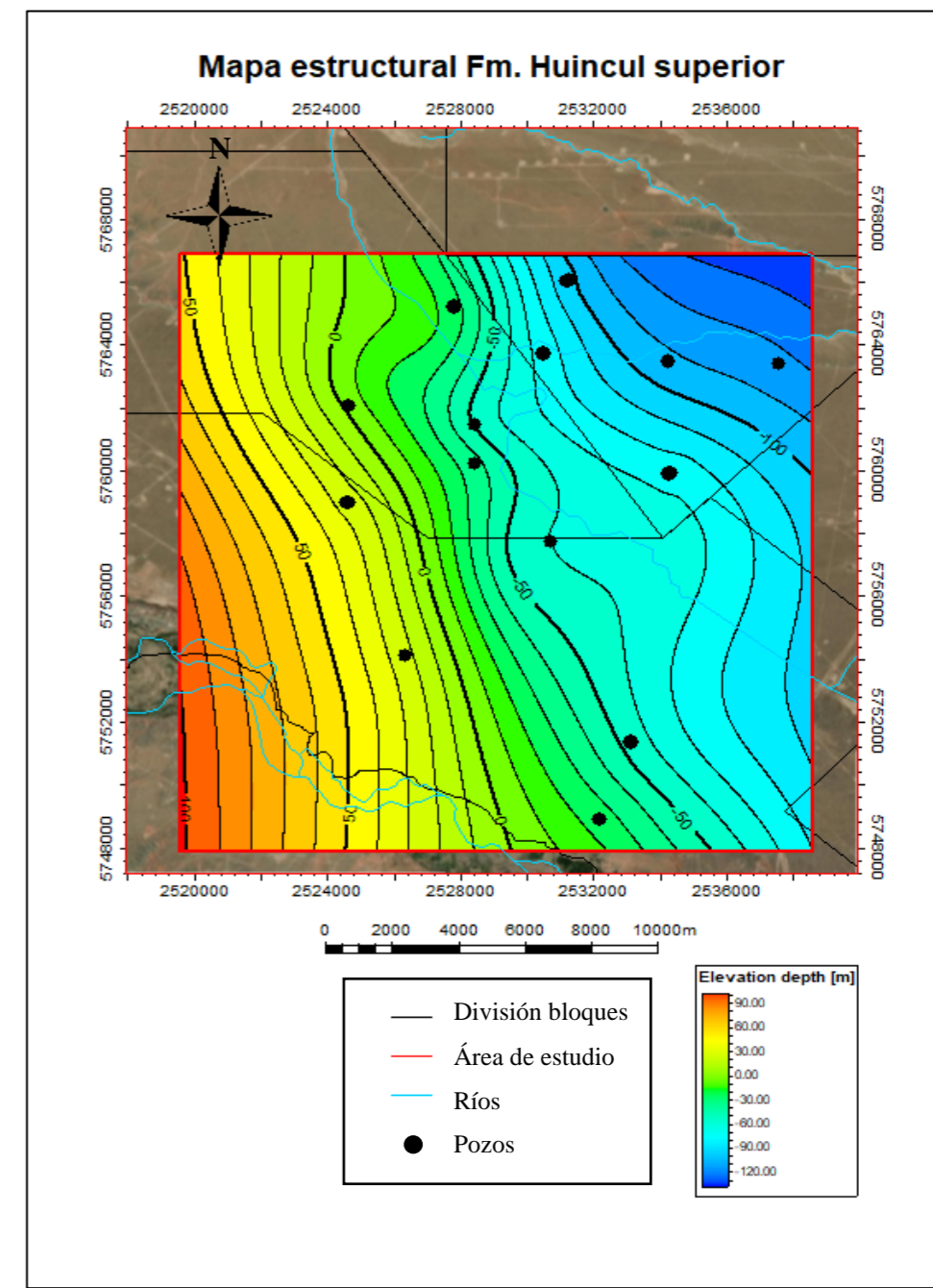


Figura 54. Mapa estructural al tope del miembro superior de la Fm. Huincul.

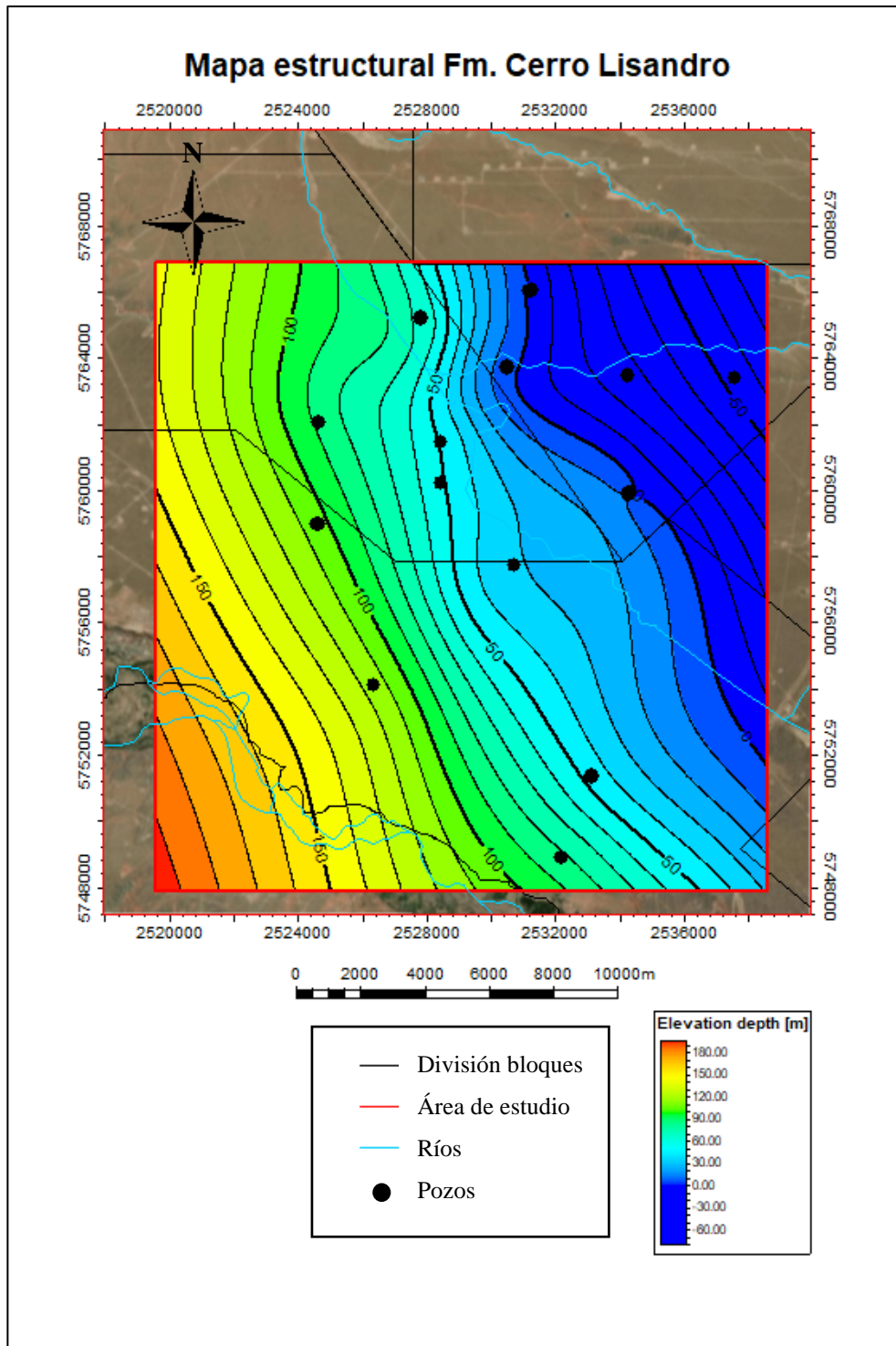


Figura 56. Mapa estructural al tope de la Fm. Cerro Lisandro.

6.9 Distribución de bicarbonatos, sulfatos y cloruros

Se generó un mapa para los bicarbonatos, sulfatos y cloruros en cada unidad geológica de interés. Los mismos son en base al porcentaje de cada determinación en la sumatoria total de los aniones presentes para poder visualizar en el área de estudio y en profundidad las variaciones existentes. La escala utilizada varía desde el color celeste indicando el 0% de concentración hasta el rojo como el 100%. Cabe resaltar que en los pozos en donde se tenía más de una muestra por unidad geológica se utilizó un promedio de ambos muestreos.

En los bicarbonatos se observa que la mayor proporción se encuentra en el Gpo. Neuquén en el sector SE y N del área de estudio con un 80% y 60% de bicarbonatos y concentraciones más bajas en el O y NE del área alcanzando como máximo el 20%. La Fm. Rayoso presenta porcentajes bajos en el sector N y S a excepción de un pozo situado en el extremo SE que posee 60% de concentración. Por otro lado, la Fm. Centenario se visualiza totalmente celeste porque es casi nulo el porcentaje de bicarbonatos presente. Por lo tanto, las altas concentraciones de bicarbonatos las vamos a encontrar en unidades más someras y va a disminuir conforme al aumento de la profundidad.

Para los sulfatos presentes en Gpo. Neuquén la distribución cambia, situándose los valores más bajos en una franja central del área y los porcentajes más elevados rondando entre 50% y 70% en el NE y O del área. La Fm. Rayoso no exhibe porcentajes que superen el 50% y la Fm. Centenario al igual que en el caso de los bicarbonatos se pinta totalmente de celeste porque es casi nulo el porcentaje de sulfatos presentes en la sumatoria total de los aniones. Al igual que en los bicarbonatos, estos disminuyen con el aumento de la profundidad.

Por otro lado, en los cloruros a diferencia de las demás determinaciones la Fm. Centenario es la que exhibe porcentajes más elevados visualizándose en el mapa toda el área de color naranja oscuro y rojo. La Fm. Rayoso es la que le sigue con una proporción de hasta 80% de cloruros en los bloques Bandurria y La Amarga Chica. El Gpo. Neuquén al igual que la Fm. Rayoso exhibe porcentajes de hasta 80 pero también porcentajes bajos. Por lo tanto, el incremento de cloruros está acompañado con el aumento de la profundidad.

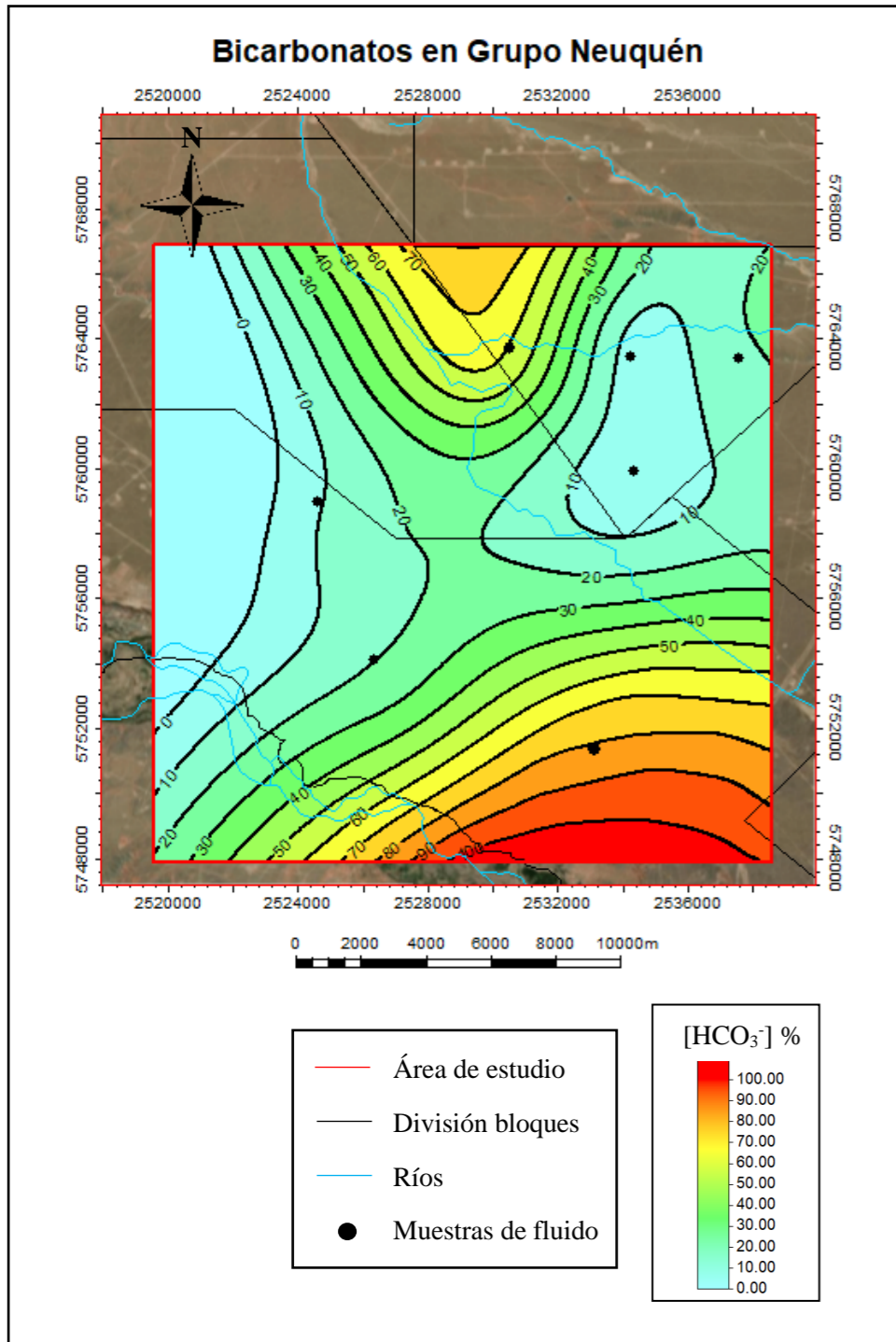


Figura 59. Distribución de los bicarbonatos presentes en el Gpo. Neuquén.

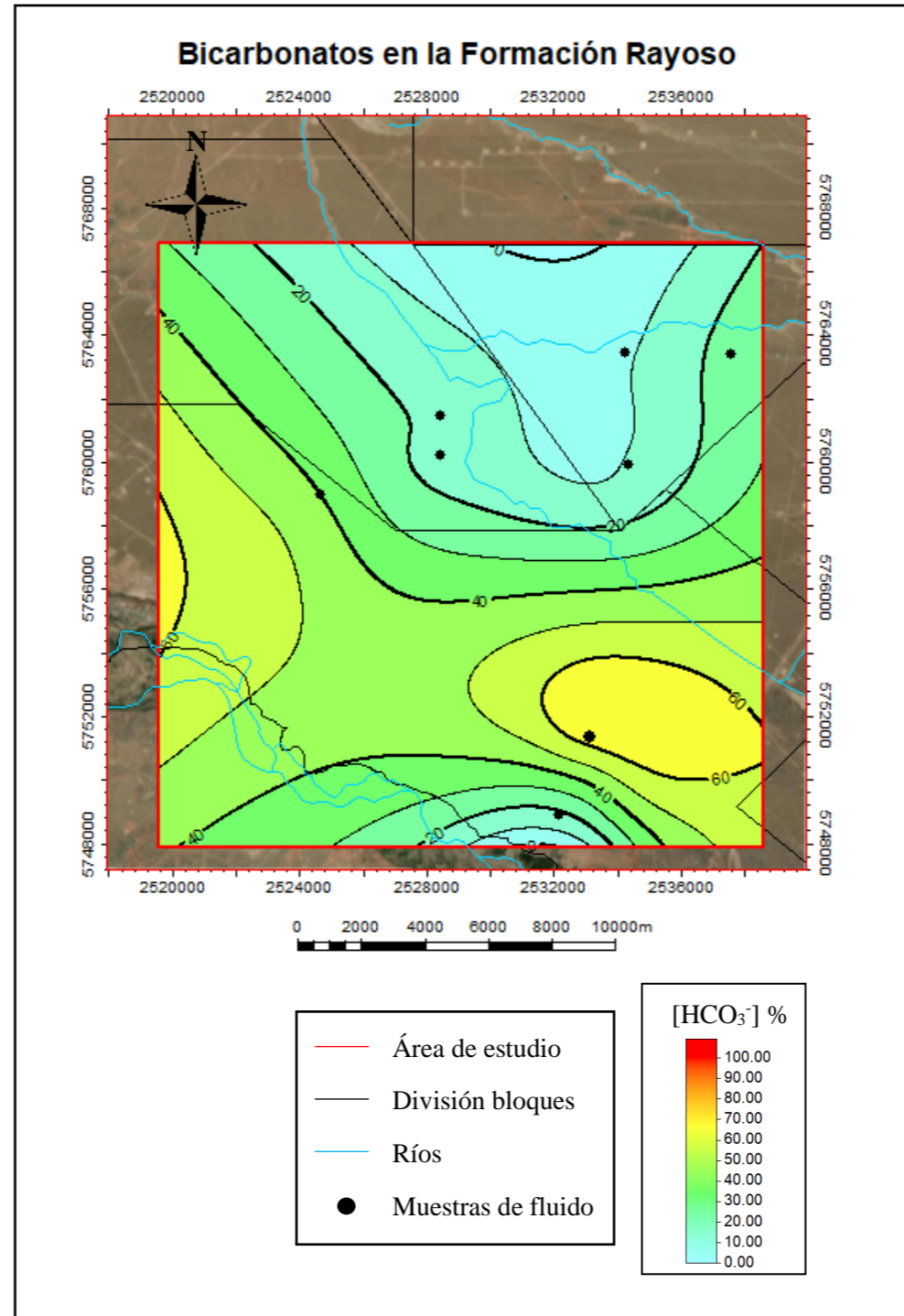


Figura 58. Distribución de los bicarbonatos presentes en la Fm. Rayoso.

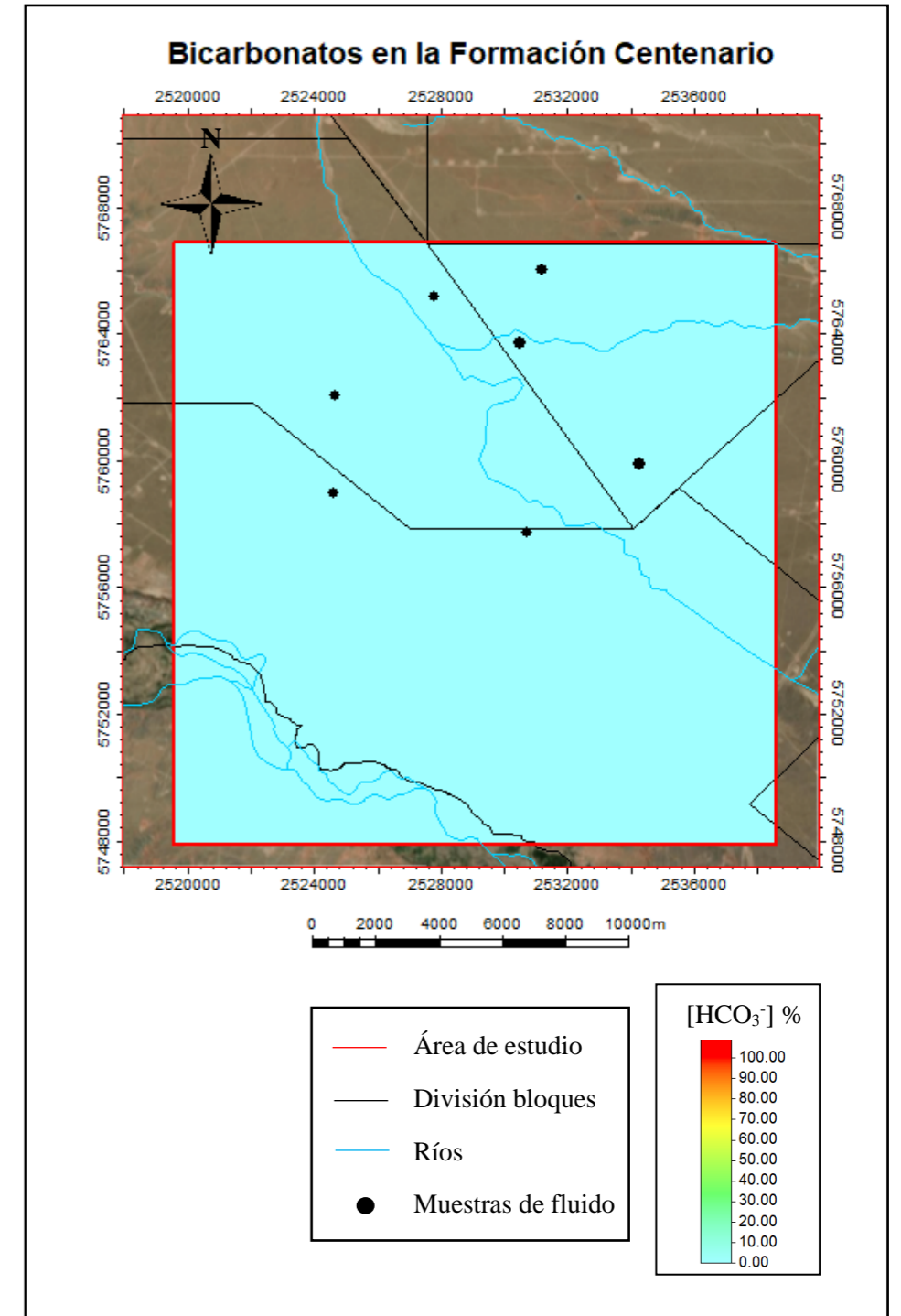


Figura 57. Distribución de los bicarbonatos presentes en la Fm. Centenario.

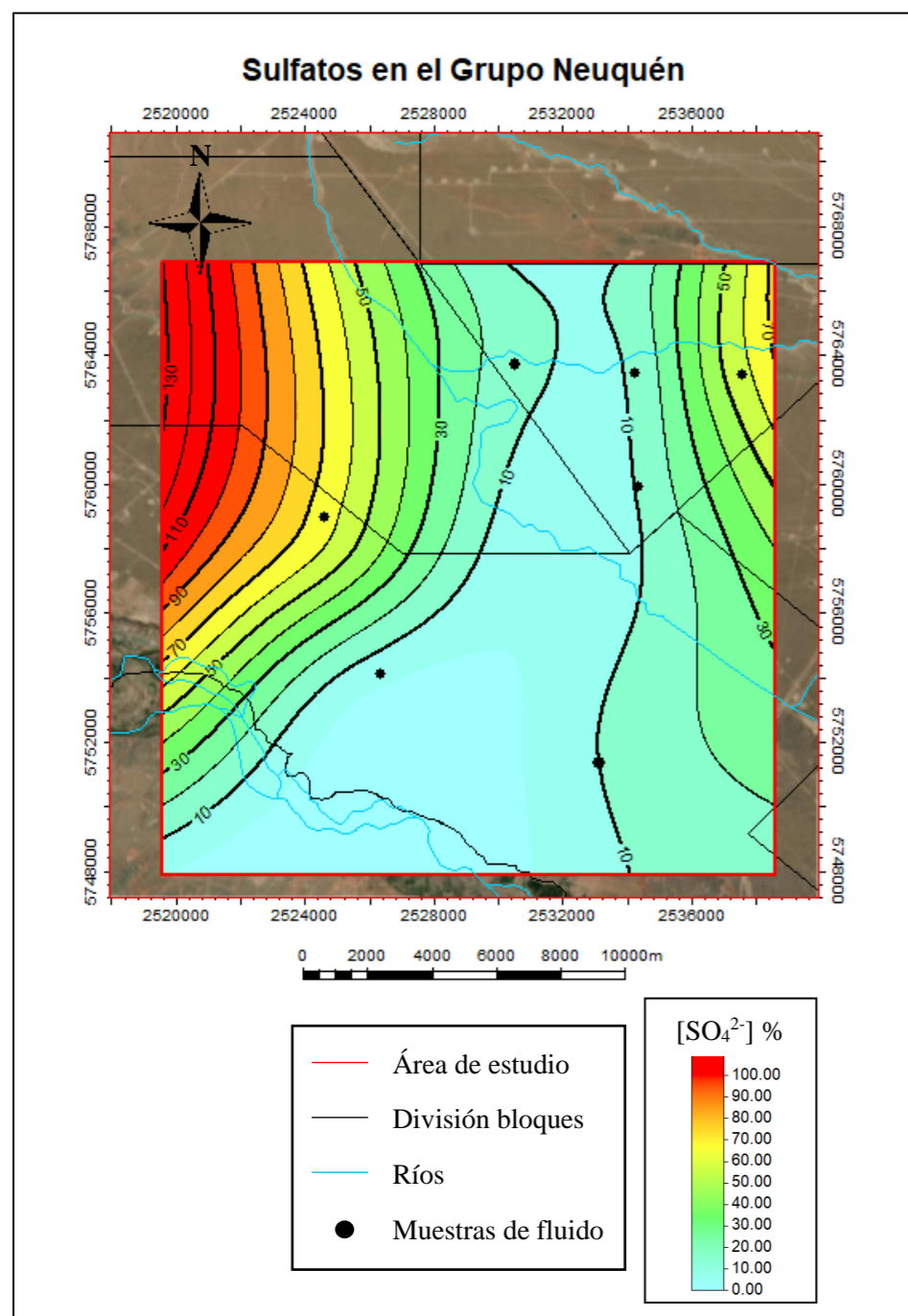


Figura 61. Distribución de los sulfatos presentes en el Gpo. Neuquén.

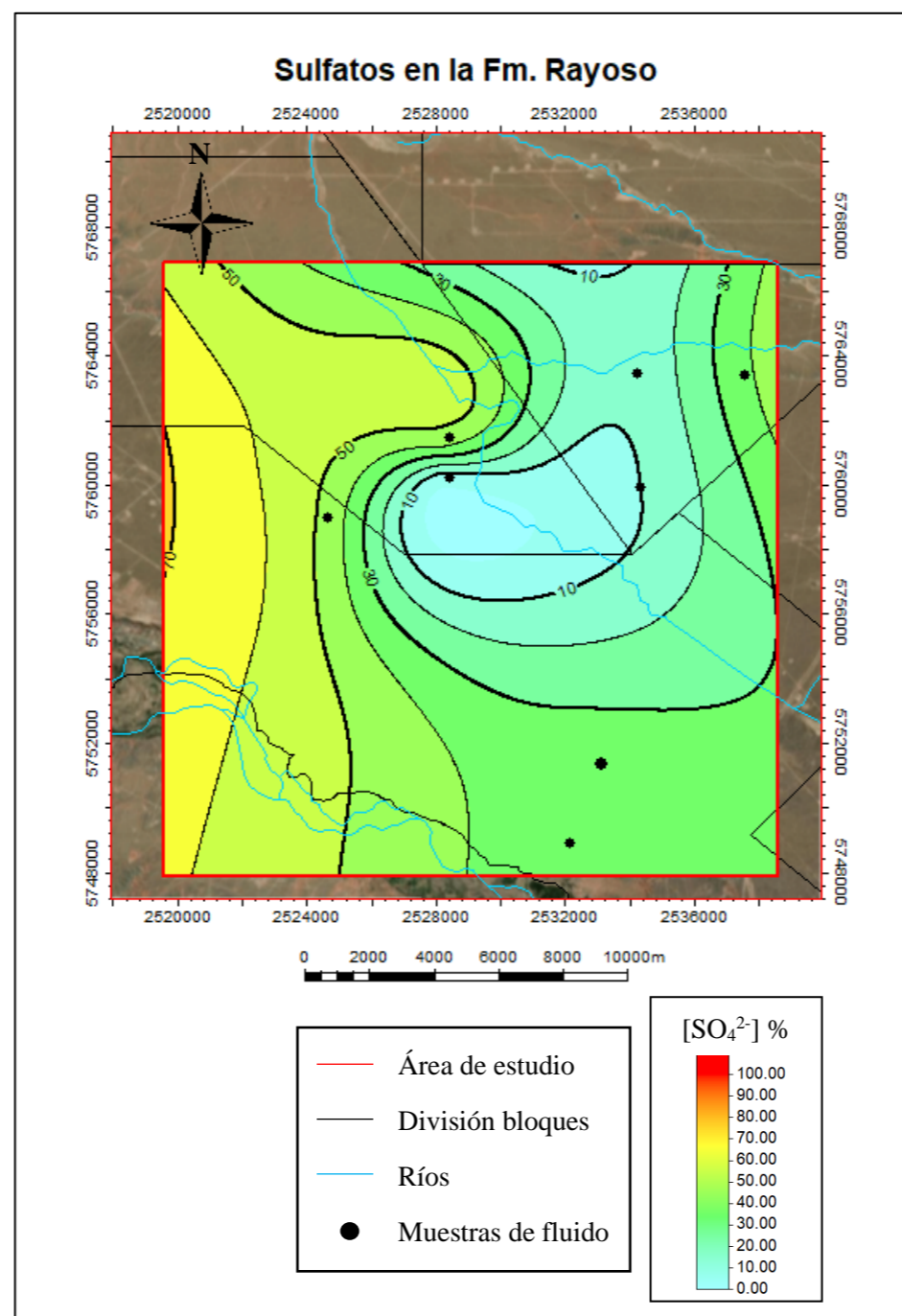


Figura 62. Distribución de los sulfatos presentes en la Fm. Rayoso.

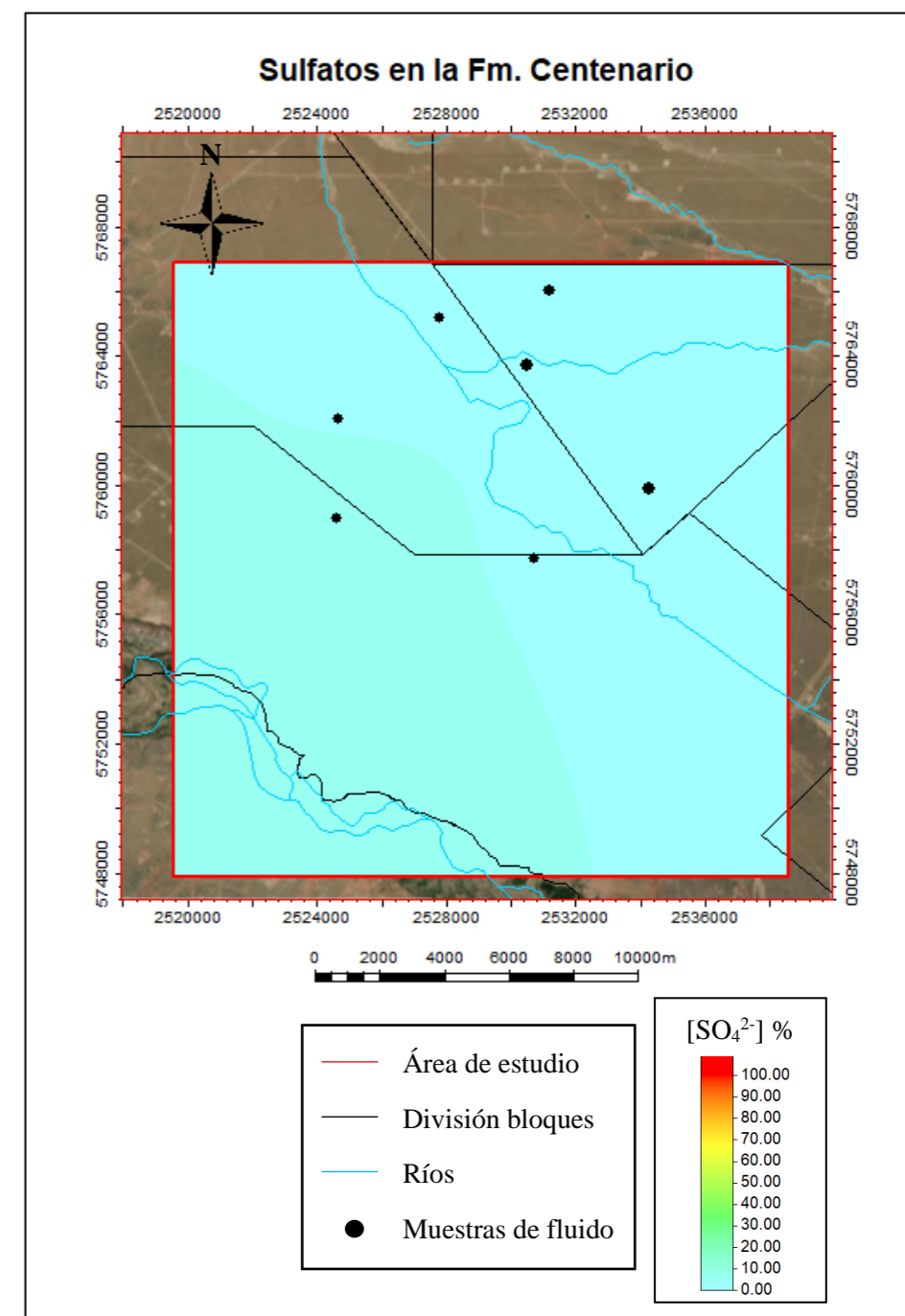


Figura 60. Distribución de los sulfatos presentes en la Fm. Centenario.

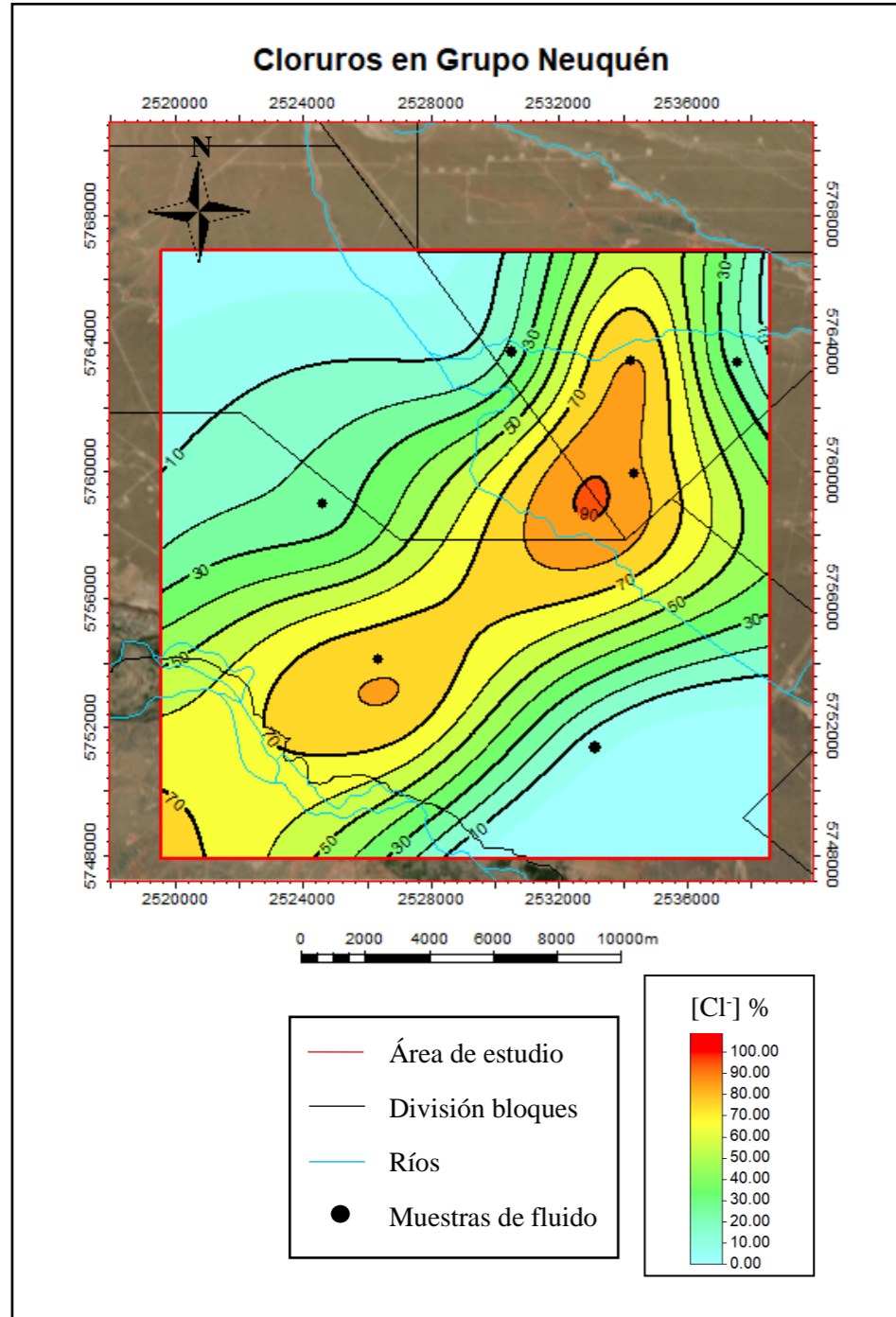


Figura 65. Distribución de los cloruros presentes en el Gpo. Neuquén

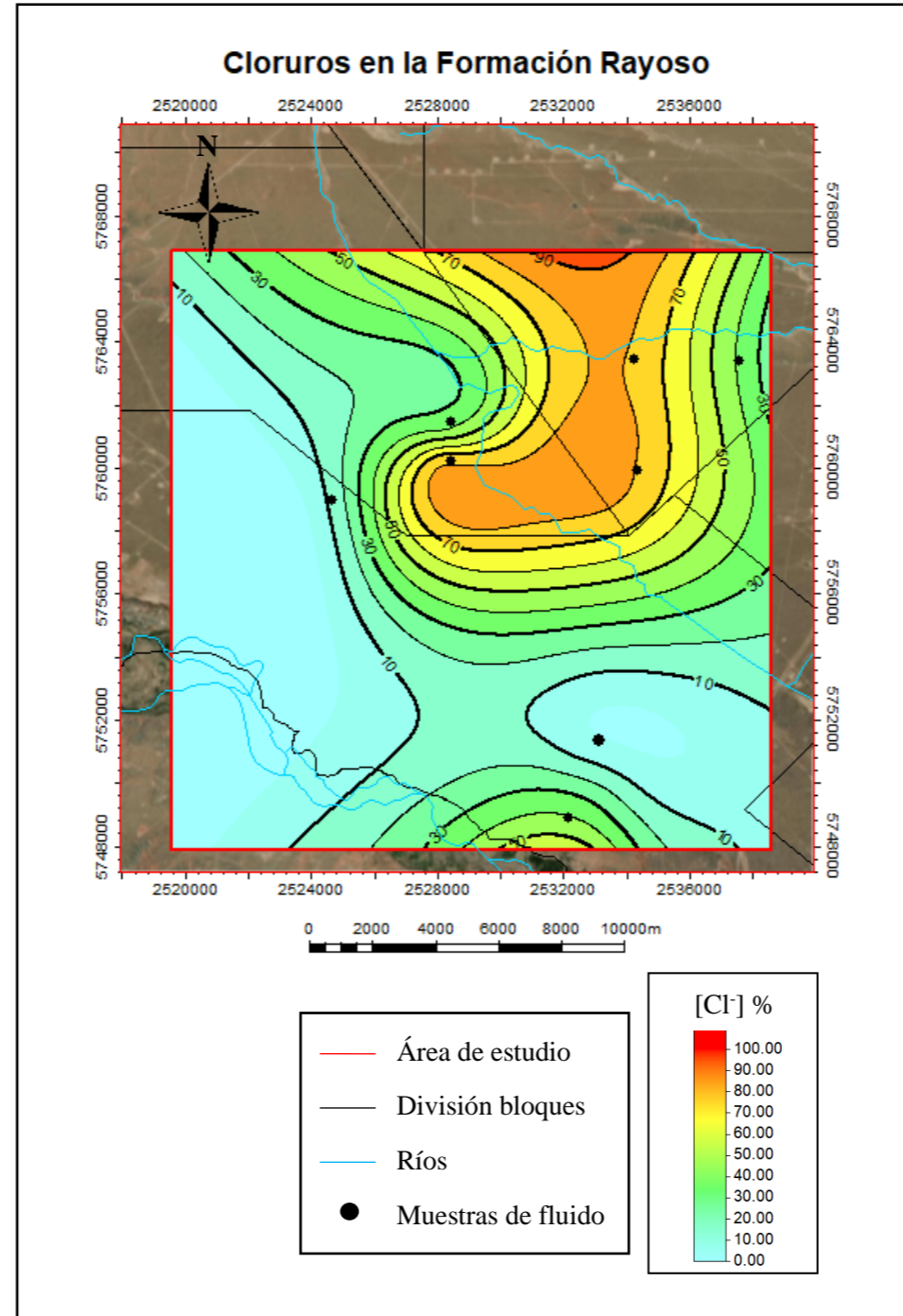


Figura 64. Distribución de los cloruros presentes en la Fm. Rayoso.

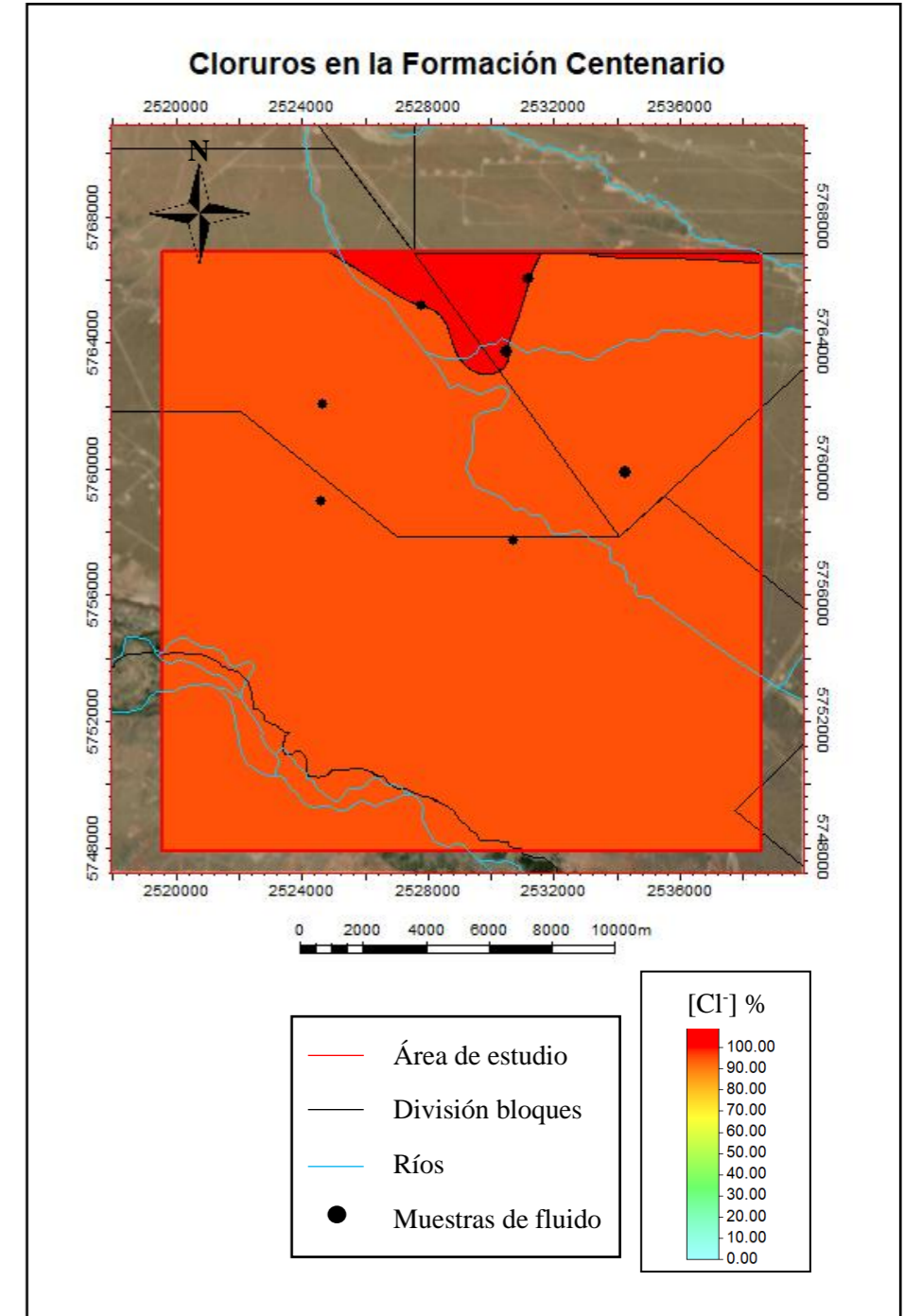


Figura 63. Distribución de los cloruros presentes en la Fm. Centenario.

6.10 Isotopía

De la totalidad de las muestras con las que se trabajó anteriormente solo en algunas de ellas se pudo destinar un volumen de fluido para realizar el análisis de isotopía. Por lo tanto, se analizaron los resultados de dichas muestras, junto con otras que fueron adquiridas dentro del área de estudio y con los mismos métodos de muestreo. A su vez, también se realizaron comparaciones con los valores isotópicos del agua del Río Neuquén y Río Colorado que fueron adquiridos por LODMMARI por Tchilinguirian (2014) en el Yacimiento El Trapial y cercanías (Tabla 20).

Muestra	Fecha muestreo	Profundidad (tvdds)	Unidad geológica	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰	d ‰	CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
M1	27/4/2022	-796,8/-1377,8	Fm. Centenario	-6,7	-65	-11,4	136.400
M2	2/4/2021	-1002,2/-1213,2	Fm. Centenario	-5,8	-60	-13,6	134.400
M3	12/10/2022	-1110,54/-1280,54	Fm. Centenario	-5,8	-54	-8,0	218.200
M4	25/8/2022	-1287,37/-1413,87	Fm. Centenario	-4,8	-50	-11,5	284.400
M5	13/10/2022	-1295,59/-1420,54	Fm. Centenario	-5,0	-50	-9,8	224.400
M6	16/3/2021	-567,4	Fm. Rayoso	-11,07	-83,24	5,3	7.530
M7	30/11/2022	-630,9	Fm. Rayoso	-10,6	-85	-0,5	6.440
M8	12/11/2022	-657,9/-676,2	Fm. Rayoso	-10,5	-86	-1,9	4.830
M9	16/3/2021	-670,3	Fm. Rayoso	-12,82	-87,26	15,3	5.820
M10	16/3/2021	-676,2	Fm. Rayoso	-12,36	-95,06	3,8	7.360
M11	2/11/2022	-744,1/-764,6	Fm. Rayoso	-11,9	-92	3,2	9.610
M12	29/9/2022	-749,5	Fm. Rayoso	-12,3	-94	3,9	34.950
M13	31/1/2020	193,8	Gpo. Neuquén	-12,43	-75,39	24,1	4.300
M14	30/11/2022	155,1	Gpo. Neuquén	-11,6	-90	3,4	2.950
M15	16/3/2021	-106,8	Gpo. Neuquén	-11,76	-89,92	4,2	6.060
M16	29/1/2020	-145,2	Gpo. Neuquén	-12,25	-85,95	12,1	7.580
M17	29/9/2022	-153,5	Gpo. Neuquén	-12,6	-97	3,5	14.940
Río Neuquén	2013	-	-	-12,6	-92,5	8	166
Río Colorado		-	-	-11,5	-88	4	1.111

Tabla 20. Resultados isotópicos brindados por el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS).

Los valores promedio de las muestras correspondientes a Gpo. Neuquén son de $\delta^{18}\text{O} = -12,12$ y $\delta^2\text{H} = -87,56$; para la Fm. Rayoso $\delta^{18}\text{O} = -11,64$ y $\delta^2\text{H} = -88,97$ y para la Fm. Centenario, mucho más enriquecidos $\delta^{18}\text{O} = -5,6$ y $\delta^2\text{H} = -55,77$.

En este análisis existen grandes variaciones en los valores de exceso de deuterio "d" que revelarían distintos orígenes de las masas de aire que generan las lluvias. Las muestras M9, M13 y M16 presentan un $d > 10\%$ lo que podría estar indicando vinculación con lluvias originadas por vapor reciclado (Dapeña *et al.*, 2005 y González *et al.*, 2009). Por otro lado, las muestras que presentan valores de d entre 0-10% son la M6, M10, M11, M12, M14, M15, M17 y las muestras de ambos ríos, típicos de aguas de fusión de nieve. En cuanto a los $d < 0$, indican procesos cinéticos de fraccionamiento e involucra a todas las muestras pertenecientes a la Fm. Centenario (M1, M2, M3, M4, M5) y dos de la Fm. Rayoso (M7 y M8).

Se pudo determinar que el Gpo. Neuquén y la Fm. Rayoso presentan la misma firma isotópica que el Río Neuquén y Río Colorado. Por lo cual, se puede concluir que el origen

de la recarga de los acuíferos presentes en dichas unidades geológicas, dentro del área de estudio, es igual al del Río Neuquén (Figura 66).

Por otra parte, las muestras pertenecientes a la Fm. Centenario a diferencia de las muestras del Gpo. Neuquén y la Fm. Rayoso presentan valores de CE muy elevados (Figura 67). A su vez, en la Figura 71 se observa cómo se encuentran alejadas de las demás muestras y de la línea meteórica global. Por lo tanto, el agua de dicha formación podría presentar una firma isotópica y genética muy diferente a la del Gpo. Neuquén y Fm. Rayoso.

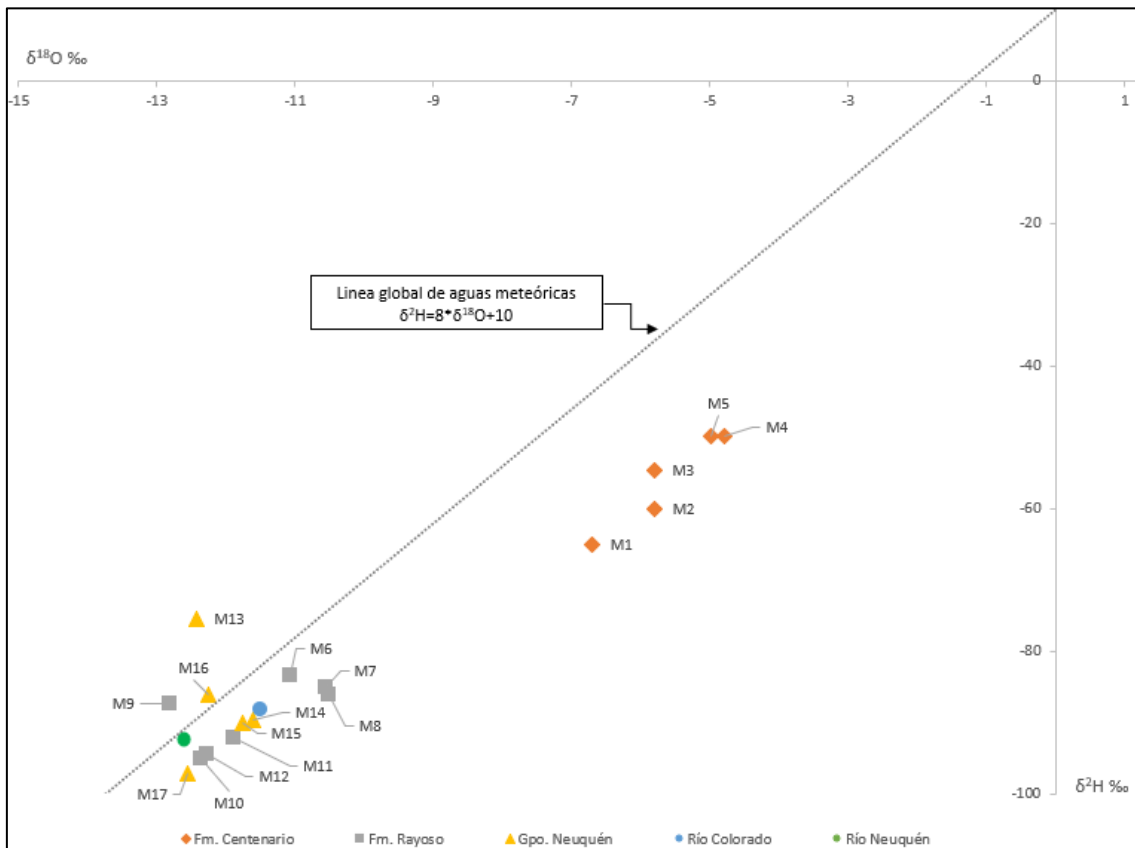


Figura 66. Diagrama $\delta^{18}O$ vs. δ^2H para las muestras en estudio.

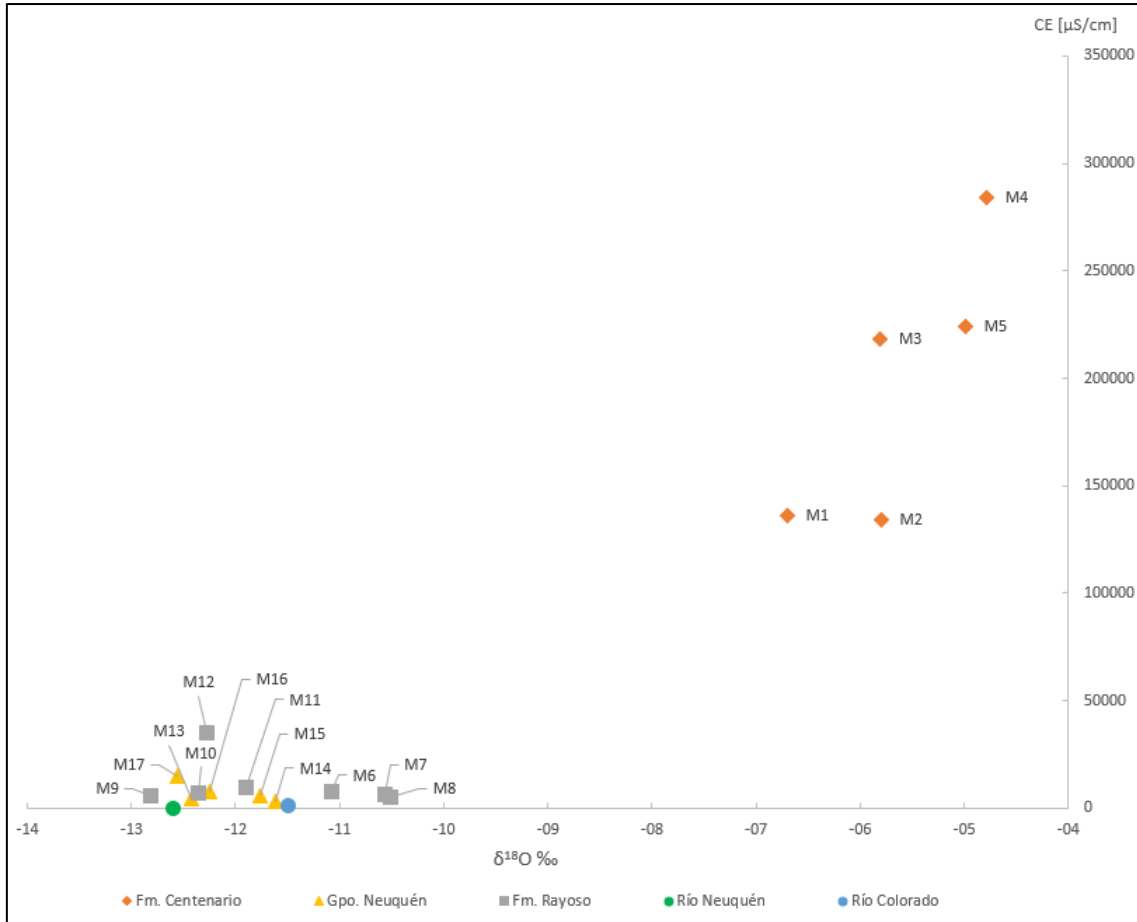


Figura 67. Diagrama $\delta^{18}O$ vs CE para las muestras en estudio.

7 CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

Gracias a las muestras de fluido pertenecientes a la Fm. Centenario se pudo concluir que el agua de dicha formación, en el área de este trabajo, es de tipo salmuera por exhibir contenido de $STD > 100.000 \text{ mg/L}$. A su vez, no es apta para consumo humano por superar en ciertos elementos los límites permitidos por el código alimentario, y, por presentar en algunos de ellos (boro, bario, flúor, cromo, nitratos) tratamientos de alta complejidad lo cual imposibilita revertir dicha situación. Por otra parte, tampoco es apta para riego por superar los $100.000 \mu\text{S/cm}$ de CE (por fuera del gráfico de Riverside), tener una $RAS > 40$ (por fuera del gráfico de Riverside) y presentar constituyentes tóxicos. En cuanto a la familia hidroquímica se clasifica en un 92% como clorurada sódica y un 8% como clorurada cálcica. El espesor calculado a partir de los topes formacionales se encuentra entre 1.136 m a 1.296 m.

El agua de la Fm. Rayoso se clasifica en un 71% de tipo salobre y en un 29% de tipo salada. Dicha agua, a su vez, no es apta para consumo humano por superar en la mayoría de las muestras los límites permitidos de flúor y boro, los cuales presentan metodologías de alta complejidad e imposibilitan su tratamiento. Además, se clasifica como no apta para riego, ya que exhibe valores de $CE > 5.000 \mu\text{S/cm}$ clasificando como clase C5, C6 (peligro de salinidad muy alto y excesivo) y por presentar al flúor y boro como elementos tóxicos. Por otro lado, respecto a las familias de aguas, se clasifica en un 53% como clorurada sódica, 20% como sulfatada sódica, 13% como bicarbonatada sódica, 7% como agua de mezcla clorurada-sulfatada sódica y el 7% restante también como agua de mezcla, pero sulfatada-clorurada sódica. En cuanto al espesor, varía entre 344 m a 416 m en esta área de estudio.

Por otro lado, el agua perteneciente al Gpo. Neuquén se clasifica en un 67% como salobre, 22% como dulce y 11% como salada. En cuanto a la aptitud para consumo humano, no es apta, por incumplir (en su mayoría) el límite del flúor el cual requiere un tratamiento de alta complejidad. Además, de la totalidad de las muestras se pudo concluir que el 78% no es apta para riego, pero existe un 22% (2 muestras pertenecientes al mismo pozo) el cual es “utilizable para riego con precauciones”, esto se debe a que no presentan constituyentes tóxicos y se encuentran dentro del rango de las clases C1 y C4 del gráfico de Riverside. En cuanto a la hidroquímica, un 34% corresponde a una familia hidroquímica sulfatada sódica, un 33% a bicarbonatada sódica y el 33% restante a clorurada sódica. Adicionalmente, se estimó el espesor de algunas de las formaciones pertenecientes a este grupo, dando como resultado para la Fm. Candeleros un espesor entre 236 m a 272 m, para la Fm. Huincul 153 m a 216 m y para la Fm. Cerro Lisandro 60 m a 108 m.

Las dos muestras que fueron clasificadas como “utilizables para riego con precauciones” pertenecen al pozo LACH-4. En pozos aledaños y en niveles similares a dichos muestreos la clasificación da como no apta, por lo tanto, mapear un área para la protección de acuíferos no es factible con la cantidad de datos disponibles que se cuenta

en este informe. Lo que se concluye, haciendo un análisis en profundidad, es que se debería proteger como mínimo hasta el tope de la Fm. Cerro Lisandro.

Respecto al porcentaje de bicarbonatos, sulfatos y cloruros sobre la totalidad de los aniones presentes, el Gpo. Neuquén exhibe los porcentajes más elevados de bicarbonatos y sulfatos, seguido se encuentra la Fm. Rayoso y, por último, la Fm. Centenario con porcentajes casi nulos. En el caso de los cloruros, la Fm. Centenario presenta casi el 100%, la Fm. Rayoso es la que le sigue, y, por último, el Gpo. Neuquén. Dicho esto, se concluye que, conforme al aumento de la profundidad, las aguas presentan mayor tiempo de permanencia y una mayor salinidad, quedando demostrado el patrón evolutivo del agua subterránea propuesto por Chebotarev (1955).

De acuerdo al mapa generado de los bicarbonatos en el Gpo. Neuquén, se ve un aumento de los porcentajes en el extremo SE del área de estudio, por lo tanto, se puede inferir que ese sector actúa como un área de recarga local. En cuanto a los niveles más profundos, no se pudo visualizar una tendencia en las determinaciones que permita vincularla a las áreas de recarga cercanas. Pero, visualizando la estructura de la sección geológica de interés, se determina que corresponde a capas homoclinales buzantes hacia el E, infiriendo que el sentido del flujo sería O-E.

En cuanto a los estudios isotópicos que se pudieron realizar, se concluye que el agua del Gpo. Neuquén y la Fm. Rayoso presentan la misma firma isotópica que el Río Neuquén y Río Colorado. Por lo cual, se puede concluir que el origen de la recarga de los acuíferos presentes en dichas unidades geológicas, dentro del área de estudio, es igual al del Río Neuquén. Por otra parte, el agua de la Fm. Centenario podría presentar una firma isotópica y genética muy diferente a la del Gpo. Neuquén y Fm. Rayoso. El origen del agua presente en la Fm. Centenario aún se encuentra en estudio y a la espera de más datos.

Por otra parte, la Fm. Candeleros y la Fm. Cerro Lisandro por su alto contenido de limoarcilitas y porque es posible su continuidad en la lateral, en el área de estudio de este informe, se las considera como un buen sello semiregional.

Cabe resaltar que todas las interpretaciones realizadas en este trabajo quedan abiertas a la disponibilidad y adquisición de nuevos datos que permitan ampliar el conocimiento sobre el área de estudio.

8 BIBLIOGRAFIA

- Alonso, M., Dufilho, A.C. y Giusano, A.,** 2016. Caracterización hidrogeológica de la Formación Rayoso y del Grupo Neuquén en el sector centro norte de la Provincia del Neuquén. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y XII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Relación Agua Subterránea – Agua Superficial: 46-53. Catamarca.
- Bertoni, L. y Dufilho, A.C.,** 2016. Caracterización hidrogeoquímica de acuíferos de la región noreste de la provincia del Neuquén. 9º Congreso Argentino de Hidrogeología y 7º Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad del Agua Subterránea, 264- 271.
- Bettini, F.H.,** 1984. Pautas sobre cronología estructural en el área del cerro Lotena, cerro Granito y su implicancia en el significado de la dorsal del Neuquén, provincia del Neuquén. IX Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 163-169.
- Blasco, F. y Rubia, J.,** 1973. Guía para clasificar aguas en su relación con la calidad para el riego. Iryda. Madrid.
- Carrica, J. C.,** 2005. Apuntes del curso: Recarga de acuíferos y modelo de balance hidrológico. Maestría en Recursos Hídricos, Universidad Nacional de La Pampa. Santa Rosa.
- Chebotarev, I.,** 1955. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering (1) Geochimica et Cosmochimica Acta 8: 22-48.
- Clark, I.,** 2015. Groundwater geochemistry and isotopes. CRC Press/ Taylor & Francis. Group, Boca Raton/London/New York. 438 p.
- Custodio, E.,** 1998. Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre”. Boletín Geológico y Minero de España, Vol. 109, No 4, 329- 346.
- Custodio, E. y Llamas, M.,** 1983. Hidrología Subterránea. Tomo I y II. Ediciones Omega S.A. 1157 p. Barcelona, España.
- Dapeña, C., Panarello, H.O., Cerne, B., González, M. y Sanchez-Ccoyllo, O.,** 2005. Contribución Preliminar a la interpretación del origen de las lluvias en el Norte de Argentina. II Seminario Hispano Latinoamericano sobre Temas actuales de Hidrología Subterránea, Actas: 37-46.

- Dapeña, C. y Panarello, H.O.**, 2008b. Isótopos en precipitación en Argentina. Aplicaciones en estudios Hidrológicos e Hidrogeológicos. IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. ALHSUD Volumen CD T-100. 8 p. Quito, Ecuador.
- Davis, S.N. y De Wiest, R.J.M.**, 1967. Hidrogeología. Barcelona: Ediciones Ariel. 560 p.
- Del Prete, P.J.**, 2019. Evaluación isotópica del agua subterránea en el Dorso de los Chihuidos, provincia del Neuquén. Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas. Universidad Nacional del Comahue. 59 p.
- Digregorio, J.H.**, 1972. Neuquén. En: Leanza A.F., (Ed.): Geología Regional Argentina. Centenario de la Academia Nacional de Ciencias: 439-506. Córdoba.
- Dingus, L., Garrido, A.C., Scott, G.R., Chiappe, L.M., Clarke, J.M y Schmitt, J.G.**, 2009. The litho-, bio-, and magnetostratigraphy of titanosaurian nesting sites in the Anacleto Formation at Auca Mahuevo (Campanian, Neuquén Province, Argentina). En: L. Barry Albright III (Ed.): Papers on Geology, Vertebrate Paleontology, and Biostratigraphy in Honor of Michael O. Woodburne. Museum of Northern Arizona Bulletin 65: 237-258.
- Garrido, A.C.**, 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (República Argentina): Nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie, 12:121-177.
- Gatica, R. J.**, 2017. Estimación de la recarga en los acuíferos de la provincia del Neuquén utilizando Sistema de Información Geográfica (SIG-GIS). Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas. Universidad Nacional del Comahue. 98 p.
- Gonfiantini, R.**, 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. Nature 271: 534.
- González, M., Dapeña, C., Cerne, B., Sanchez-Ccoyllo, O., Freitas, S., Silva Dias, P. y Panarello, H.**, 2009. Verification of the geographical origin of modeled air-mass trajectories by means of the isotope composition of rainwater during the SALLJEX experiment. Environmental Fluid Mechanisms. Springer Verlag. 1-17. ISSN 1567-7419.
- Keidel, J.**, 1917. Über das patagonische Tafelland und ihre ziehungen zu den geologischen ercheinungen in den Argentinischen Anden gebiet und Litoral. Zeitschrift der Deutsche Akademie Wiessenschaft 3(5-6): 219-245. Stuttgart.

- Leanza, H.A.**, 2009. Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie 11 (2): 145-184. Buenos Aires.
- Leanza, H.A., Hugo, C., Repol, D., González, R., Danieli, J.C. y Lizuain, A.**, 2001. Hoja Geológica 3969-I, Zapala. Provincia del Neuquén. 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Boletín 275, 134 p.
- Legarreta, L. y Uliana, M.**, 1999. El Jurásico y Cretácico de la Cordillera Principal y la Cuenca Neuquina. 1. Facies Sedimentarias. En: Caminos, R. (ed.) Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales, 29, 399-416.
- Meconi, G.**, 2015. Neuquén Group and Rayoso Formation Aquifer System (S.A.Ne.Ra.), Neuquén Basin, Argentina: proposed denomination, study and Integrated Water Resource Management (IWRM). 42nd International Association of Hydrogeologists Congress, Roma.
- Meconi, G.**, 2016. Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso (S.A.Ne.Ra.). Sistematización para uso sustentable en reservorios no convencionales de la Cuenca Neuquina. IX Congreso Argentino de Hidrogeología. Tomo Hidrogeología Regional, 228-237.
- Méndez, V., Zanettini, J.C. y Zappetini, E.O.**, 1987. Aspectos geológicos del Orógeno Andino Central de la República Argentina. X Congreso Geológico Argentino. Actas 1: 181-184.
- Mook, W.G.**, 2002. Isótopos ambientales en el ciclo hidrogeológico: principios y aplicaciones. IGME. Madrid, 596 p.
- Ramos, V.A., Zapata T., Cristallini, E. & Introcaso, A.**, 2004. The Andean thrust system: latitudinal variations in structural styles and orogenic shortening. En: McClay, K. (Ed.): Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 82(3): 30-50.
- Ramos, V.A., Folguera, A. y García Morabito, E.**, 2011. Las Provincias Geológicas del Neuquén. Relatorio Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. XVIII Congreso Geológico Argentino. Neuquén. 317 – 326.
- Richards, L. A.**, 1954. Diagnosis and improvement of saline and álcali soils. USDA Agricultural Handbook 60, 160 p. 172 p.

- Rolleri, E.O.**, 1976. Sistema de San Bárbara. 6° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 240-255. Buenos Aires.
- Sánchez San Román, F.J.**, 2012. Hidráulica Subterránea: Principios básicos. Universidad de Salamanca. 13 p. (En: <http://hidrologia.usal.es>)
- Sánchez San Román, F.J.**, 2014. Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. Universidad de Salamanca. 11 p. (En: <http://hidrologia.usal.es>)
- Tchilinguirian, P.**, 2014. Hidrogeología del Yac. El Trapial, con énfasis en el Grupo Neuquén. Informe inédito. 115 p.
- Tunik, M., Folguera, A., Naipahuer, M., Pimentel, M. y Ramos, V.**, 2010. Early uplift and orogenic deformation in the Neuquén Basin: constraints on the Andean uplift from U-PB and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics* 489(1-4): 258-273.
- United Nations Environment Programme (UNEP)**, 1997. World Atlas of Desertification. 2nd. ed. Oxford University Press. 182 p.
- Vélez, M. V.**, 2004. Hidráulica de Aguas Subterráneas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, facultad de Minas, Universidad Nacional. 3 ed. 404 p.
- Ven Te Chow, Maidment, D.R. y Mays, L.W.**, 1994. Hidrología Aplicada. Mc Graw-Hill Interamericana. 584 p.
- Zavala, C. y Ponce, J.J.**, 2011. La Formación Rayoso (Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: 205-222, Neuquén.
- Zektser, I.S. y Loaiciga, H.A.**, 1993. Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future. *Journal of Hydrology* 144, 405-427.

ANEXO 2

Pozo	Cota	Coordenadas Chos Malal		Pases formacionales tvds [m]							
		X	Y	Tope Fm. Cerro Lisandro	Tope Fm. Huincul superior	Tope Fm. Huincul inferior	Tope Fm. Candeleros	Tope Fm. Rayoso	Tope Fm. Centenario superior	Tope Fm. Centenario inferior	Tope Fm. Mulichinco
LACH-1	433,78	5763592.29	2534195.99	-26,56	-107	-229,81	-271,55	-532,35	-890,1	-1336,2	-2159,78
LACH-2	439,27	5760034.31	2534263.39	2,79	-72,61	-218,73	-265,37	-531,26	-884,71	-1336,89	-2159,78
LACH-3	504,33	5763534.69	2537525.07	-54,06	-117,19	-266,1	-300,96	-560,15	-927,12	-1356,66	-2188,4
LACH-4	398,41	5763849.94	2530442.16	3,63	-74,64	-201,62	-243,07	-492,86	-860,4	-1291,02	-2057,71
LACH-5	407,46	5766173.69	2531136.18	-2,21	-97,12	-223,23	-272,33	-510,85	-902,97	-1293,14	-2100,18
LACH-6	439,26	5760034.28	2534213.45	7,36	-75,85	-217,67	-265,37	-530,84	-885,64	-1334,66	-2159,78
LCav-1	410,01	5761590.10	2528387.74	48,93	-50,74	-179,3	-224,48	-472,77	-818,76	-1275,15	-2024,36
LCav-2	406,22	5760338.89	2528385.58	51,31	-37,23	-174,62	-222,11	-470,73	-815,58	-1268,8	-2024,36
LCav-3	456,76	5762171.60	2524581.33	87,95	-2,28	-130,89	-175,11	-423,92	-791,35	-1244,92	-1980,97
LCav-4	371,13	5765331.32	2527719.82	65,01	-27,97	-186,88	-226,95	-470,35	-835,03	-1268,01	-2071,37
LLL-1	403,2	5749031.85	2532113.82	82,13	-25,02	-164,3	-216,12	-481,01	-832,18	-1244,84	-2074,67
LLL-2	503,5	5751491.78	2533062.12	46,33	-53,88	-205,15	-257,09	-504,97	-865,51	-1324,3	-2111,15
LLL-3	516,72	5754255.50	2526279.00	115,09	22,96	-125,08	-171,31	-411,55	-799,4	-1229,25	-1968,78
LLL-4	489,81	5759105.47	2524588.66	103,52	25,73	-106,26	-157,49	-402,69	-786,5	-1219,44	-1992,68
LLL-5	489,8	5759105.41	2524538.60	104,25	24,64	-107,16	-158,22	-401,8	-786,5	-1219,44	-1992,68
LLL-6	421,7	5757865.54	2530675.41	31,22	-60,06	-191,77	-245,67	-495,92	-856	-1306,83	-2081,9