

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



Trabajo Final de Licenciatura

EVALUACIÓN ISOTÓPICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL DORSO LOS CHIHUIDOS, PROVINCIA DE NEUQUÉN

Autora: Del Prete, Paula Jazmín

Directora: Dufilho, Ana Cecilia

Co- Directora: Cabrera, Adriana





Trabajo Final de Licenciatura – Del Prete, Paula J., 2019

Universidad Nacional del Comahue - Facultad de Ingeniería
Lic. en Ciencias Geológicas - Dpto. de Geología y Petróleo

EVALUACIÓN ISOTÓPICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL DORSO LOS CHIHUIDOS, PROVINCIA DE NEUQUÉN

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

Autora: Del Prete, Paula Jazmín. N° Legajo: ING-2352.

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

Co- Directora: Dra. Cabrera, Adriana. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Río Cuarto.

Jurado 1: Geól.Curetti, Nadia.

Jurado 2: Ing. Horne, Federico.

Jurado 3: Dr. Calvo, Jorge O.

Neuquén Capital, Argentina.

Año 2019



ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
1 INTRODUCCIÓN.....	4
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos	5
2 ANTECEDENTES	6
3 MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO.....	8
3.1 Hidrogeología.....	8
3.1.1 Ciclo del agua.....	8
3.1.2 Agua subterránea	9
3.1.3 Clasificación de formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico.....	10
3.1.4 Clasificación de los acuíferos según su funcionamiento hidráulico	11
3.2 Características físico-químicas del agua subterránea.....	12
3.2.1 Representación de características químicas del agua	13
3.3 Evolución del agua	14
3.4 Hidrogeoquímica isotópica	16
3.4.1 Introducción	16
3.4.2 ^2H y ^{18}O Los isótopos estables y su comportamiento en el marco del ciclo hidrológico	16
3.4.3 Fraccionamiento isotópico	16
3.5 Sistemas de Información Geográfica.....	20
4 CARACTERIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	22
4.1 Ubicación geográfica.....	22
4.2 Clima	22
4.3 Suelo	23
4.4 Vegetación.....	24
4.5 Geología Dorso Los Chihuidos.....	25
4.5.1 Unidades estratigráficas con interés hidrogeológico: Fm. Rayoso y Grupo Neuquén	26



4.6	Geomorfología	29
4.7	Hidrología superficial y subterránea.....	31
5	RESULTADOS.....	33
5.1	Modelo hidrogeológico conceptual.....	33
5.2	Caracterización hidrogeoquímica	35
5.2.1	Información disponible	35
5.2.2	Resultados hidrogeoquímicos obtenidos en el campo	37
5.2.3	Tipificación y evolución del agua subterránea.....	38
5.3	Caracterización isotópica.....	43
5.3.1	Información disponible	43
5.3.2	Resultados isotópicos	44
5.3.3	Relación deuterio- oxígeno 18	45
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	48
7	BIBLIOGRAFÍA.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 3.1. Ciclo hidrológico (Vich, 1996).</i>	8
<i>Figura 3.2. Distribución del agua en la Tierra (Alonso, 2016).</i>	8
<i>Figura 3.3. Distribución vertical del agua en el suelo (Sánchez San Román, 2012).</i>	9
<i>Figura 3.4. Red de flujo que esquematiza el flujo subterráneo natural en una región de conductividad homogénea (Sánchez San Román, 2012).</i>	10
<i>Figura 3.5. Esquema de acuíferos semiconfinados y libres (Sánchez San Román, 2014).</i>	11
<i>Figura 3.6. a) Superficie freática paralela a la topografía. b) Superficie freática profunda y acuífero colgado (Sánchez San Román, 2014).</i>	12
<i>Figura 3.7. Procesos que modifican la composición química del agua (Lillo, 2007).</i>	15
<i>Figura 3.8. Evolución del agua según la secuencia de Chebotarev (Sánchez San Román, 2012).</i> . 15	
<i>Figura 3.9. Relación entre las variaciones naturales de $\delta^{18}\text{O}$ y δD^2 del agua oceánica, el vapor atmosférico y la precipitación. El círculo negro representa el valor hipotético del vapor de agua en equilibrio isotópico con el agua del mar, el cuadrado negro la composición isotópica observada en el vapor oceánico del Ecuador, que se origina a partir del fraccionamiento más realista que se da fuera del equilibrio. El vapor marino se condensa gradualmente para dar lugar a la precipitación (flecha rayada) mediante un fraccionamiento positivo, haciendo que el vapor se vaya empobreciendo progresivamente del ^{18}O y el ^2H (flecha gris) (Mook, 2002).</i>	18
<i>Figura 3.10. Línea meteórica mundial comparada con los cambios de la composición isotópica del agua producida por diferentes procesos (Valenzuela et al., 2013).</i>	19
<i>Figura 4.1. Ubicación del área de estudio (Sistema de coordenadas PosGAR 94).</i>	22
<i>Figura 4.2. Precipitación (mm) vs Evapotranspiración potencial (mm), obtenido mediante datos climáticos del interpolador climático LocClim (Gatica, 2017).</i>	23
<i>Figura 4.3. Principales ordenes de suelo. Fuente: Irisarri (2006).</i>	24



Figura 4.4. Estructuras fisionómicas de la vegetación. Fuente: Movia et al. (2007).....	25
Figura 4.5. Unidades litoestratigráficas. Fuente: Copade (2002).	26
Figura 4.6. Cuadro estratigráfico y de equivalencias de nomenclatura de la Fm. Rayoso (Zavala y Ponce, 2011).	27
Figura 4.7. Esquema litoestratigráfico del Grupo Neuquén (Garrido, 2011).	28
Figura 4.8. Perfil geológico oeste a este en el centro del área de estudio (línea AA´en fig. 4.5).....	29
Figura 4.9. Pisos altitudinales (A) y pendientes (B) en el Dorso Los Chihuidos.....	30
Figura 5.1. Niveles potenciométricos en la unidad acuífera Fm. Candeleros en el área de estudio.....	33
Figura 5.2. Modelo hidrogeológico conceptual.....	34
Figura 5.3. Sitios muestreados durante la salida de campo (i-número)-y sitios con información de análisis químicos (números) recopilados en el Proyecto 04/I205 y 04/I243.....	35
Figura 5.4. Diagrama de Piper con muestras de seis vertientes y once perforaciones ubicados dentro del área de estudio con Diagrammes v6.5.....	40
Figura 5.5. Distribución geográfica del diagrama de Stiff de cada muestra de agua en el área de estudio.....	41
Figura 5.6. Tipos representativos de aguas subterráneas presentes en el área de estudio.	42
Figura 5.7. Muestreos de agua del año 2007 y 2013 en Yacimiento El Trapial y cercanías (Tchilinguirian, 2014).	43
Figura 5.8. Excesos de deuterio de las muestras de aguas analizadas.	45
Figura 5.9. Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ para aguas subterráneas del área de estudio, Yacimiento El Trapial y precipitaciones de Bariloche.	45
Figura 5.10. Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs. CE para las muestras analizadas.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Pozo exploratorio para agua realizado por la empresa Total Austral S. A.	34
Tabla 5.2. Síntesis de las principales características de los pozos AP.ww3 y AP.ww4	35
Tabla 5.3. Perforaciones y vertientes utilizadas indicando coordenadas, cota del terreno, formación geológica, fecha y fuente. SD: sin datos (Fuente Proyecto 04/I205).	36
Tabla 5.4. Composición química del agua. Cationes y aniones en mg/l. (Fuente Proyecto 04/I205). CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$, * estimadas a partir de la salinidad analítica.	37
Tabla 5.5. Vertientes, pozos, perforaciones y cauces muestreados con coordenadas, cota topográfica, formación geológica y fecha.	37
Tabla 5.6. Resultados del censo hidrogeológico realizado.	37
Tabla 5.7. Estadísticos de los parámetros hidrogeoquímicos de las muestras.	38
Tabla 5.8. Valores isotópicos de las muestras de las aguas de ríos en Yacimiento El Trapial y cercanías (Tchilinguirian, 2014).	44
Tabla 5.9. Resultados del análisis isotópico realizado por el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS). Fecha de evaluación 10/07/19.....	44



RESUMEN

En la zona extraandina de la provincia de Neuquén, la escasez de precipitaciones (<200 mm anuales) no permite el buen desarrollo de una red hidrológica de cursos permanentes, por lo que el agua subterránea es la única fuente de abastecimiento para pobladores rurales. Por esto, es de vital importancia el estudio de los acuíferos, evaluando los parámetros que pueden condicionar la circulación y características de las aguas subterráneas, para así tener las bases necesarias para gestionar y planificar un manejo eficiente del recurso y evitar su agotamiento.

En este trabajo se interpretan datos fisicoquímicos, químicos e isotópicos (^2H y ^{18}O) de vertientes, pozos, perforaciones y cauces en el Dorso Los Chihuidos, en el departamento de Ñelo, con el propósito de determinar el origen y circulación del agua subterránea, para así contribuir al conocimiento de la recarga y dinámica del Sistema Acuífero de la Cuenca Neuquina en esta área.

Se realizó un relevamiento de campo en el que se obtuvieron datos isotópicos del área bajo estudio que, luego, fueron interpretados junto con información de análisis químicos existentes, fundamentalmente del Ente Provincial de Agua y Saneamiento de Neuquén (EPAS) e información disponible en el proyecto de investigación de la Facultad de Ingeniería 04/I205 y 04/I243. Además, se elaboró cartografía geohidrológica e isotópica con *ArcGIS 10.5* a escala 1:250.000.

El grado de evolución del agua incrementa en el sentido del flujo subterráneo, es decir, hacia el este. Los resultados hidroquímicos indican que los acuíferos de Fm. Candeleros tienen aguas de composición sulfatada sódica y mixta, en cambio, Fm. Rayoso tiene aguas bicarbonatadas mixtas, cloruradas mixtas y sulfatadas cloruradas sódicas.

Por otro lado, los resultados isotópicos reflejaron composiciones promedio de $-10,44\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y de $-82,63\text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$ y valores de exceso de deuterio menores a 10‰ , típico de precipitaciones níveas. La interpretación confirmó que los acuíferos presentes en la Fm. Candeleros en el área de estudio son recargados por precipitaciones locales, originadas a distintas altitudes.

Las conclusiones obtenidas pueden ajustarse con mayor cantidad de datos de captaciones y vertientes junto con datos de precipitaciones locales, que permitan construir una recta meteórica local.

Palabras claves

Acuífero – Isótopos estables – Recarga – Geoquímica – Formación Candeleros - Formación Rayoso.



ABSTRACT

In the extra- Andean area of Neuquén province, the precipitation shortage (>200 mm annuals) does not allow the proper development of a hydrological network of permanent courses. So that, groundwater is the only source of supply for local people. For this reason, the study of aquifers is vital evaluating the parameters that can condition the circulation and characteristics of groundwater, in order to have the necessary bases to carry out an efficient management and planning of the resource and avoid its depletion.

In this work, physicochemical, chemical and isotopic data (^2H and ^{18}O) of water spring, wells, perforations and riverbed in the Dorso Los Chihuidos, in Añelo, are interpreted in order to determine the origin and circulation of groundwater, to contribute to the knowledge of the recharge and dynamics of the Neuquén Basin Aquifer System in this area.

A field survey was performed in which isotopic data of studied area were obtained, which were then interpreted along with chemical analysis information, mainly from the Provincial Entity of Water and Sanitation of Neuquén (EPAS) and information available in the investigation project of the Engineering Faculty 04/I205 and 04 / I243. In addition, geohydrological and isotopic mapping was designed with ArcGIS 10.5 at a scale of 1: 250.000.

Normal geochemical evolution is observed in the direction of groundwater flow, that is to the east. The hydrochemical results indicate that the aquifer of Candeleros formation has sulfated sodium and mixed waters, however, Rayoso formation has mixed bicarbonated, mixed chlorinated and sodium chlorinated sulfate waters.

On the other hand, the isotopic results reflected average compositions of -10.44‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -82.63‰ for $\delta^2\text{H}$ and deuterium excess values less than 10‰ , typical of snowfall. The interpretation confirmed that the aquifers present in Candeleros formation in the study area are recharged by local rainfall, originating at different altitudes.

The conclusions obtained can be adjusted with a greater amount of perforation data and water spring, together with local precipitation data, which allow the construction of a local meteoric line.

Keywords

Aquifer – Stable isotopes – recharge – Geochemistry – Candeleros Formation – Rayoso Formation.



AGRADECIMIENTOS

A mis papas, por darme todo siempre y más. Por confiar en mí y empujarme todas las veces que fueron necesarias para no bajar los brazos. Por hacer que mi única preocupación en este tiempo sea estudiar y cumplir mis metas.

A mis hermanos y a toda mi familia.

A Cecilia y Adriana, por el apoyo constante y tiempo dedicado. Gracias por compartir sus conocimientos y ser parte del cierre de esta etapa.

A Jorge Irisarri y Santiago Kohler, por acompañarme, junto con Cecilia, a la campaña de campo para recolectar las muestras.

Al jurado evaluador de este trabajo.

A todos los profesores de la carrera.

A Jorge Calvo que, junto al equipo de Proyecto Dino, nos hospedaron en sus instalaciones durante los días de muestreo.

A las empresas e instituciones que colaboraron, facilitando el acceso a datos e información.

A mi país, por darme la posibilidad de estudiar en la universidad pública y gratuita.

A mis compañeros, en especial a Caro, por las horas de estudio, charlas motivacionales y resúmenes prestados.

A mis amigos, siempre están al pie del cañón, pase lo que pase.

A mi amiga Flor, por ser incondicional.

A todos los que me acompañaron durante esta hermosa etapa, GRACIAS.



1 INTRODUCCIÓN

El agua es el líquido más abundante de nuestro planeta y es un recurso natural indispensable para la vida en el mismo. Si se considera su continuidad y persistencia en el ciclo hidrológico, puede ser considerada como un recurso natural renovable, aunque puede transformarse en un recurso finito a escala humana en los acuíferos libres profundos o confinados en las zonas áridas o semiáridas, debido a que los tiempos de renovación pueden ser de varios miles de años.

El problema reside en que el desarrollo humano sostenible depende de la disponibilidad de agua dulce que es la menos abundante, ya que corresponde al 2,5% de los recursos hídricos globales. Las reservas más abundantes de agua dulce son acuíferos, por lo que comprenden la mayor fuente disponible para el consumo, sin olvidar los ríos y lagos que son fuentes menos abundantes.

Es importante la comprensión del ciclo hidrológico para lograr una gestión eficiente del recurso hídrico tanto en la actualidad como en el futuro, ya que la explotación de acuíferos que no son activamente recargados puede implicar su agotamiento. Además, la demanda de este recurso subterráneo está en aumento (Custodio y Llamas, 1983).

Por lo tanto, para un buen conocimiento de los recursos son fundamentales las investigaciones geoquímicas e isotópicas que permitan establecer las causas de la calidad de aguas, el origen y áreas de recarga y establecer jerarquías de flujos subterráneos. De este modo, la disolución de iones en el agua puede ser utilizada para mostrar los procesos que controlan la calidad del agua y son útiles para la evaluación de la relación de la mineralogía de un acuífero y la composición química del agua subterránea. La hidrología isotópica es una técnica nuclear que utiliza tanto isótopos estables como radiactivos para seguir el movimiento del agua en el ciclo hidrológico y, es aplicada en todo el mundo (Peralta Vital *et al.*, 2015). La abundancia de los isótopos de oxígeno y de hidrógeno en el ciclo, las concentraciones de iones mayores disueltos en agua y el conocimiento del marco hidrológico se utilizan de forma conjunta para conceptualizar y definir los patrones de flujo del agua subterránea, así como para identificar los principales mecanismos de recarga y descarga. La composición isotópica del agua subterránea refleja la composición del agua de la recarga, pudiendo ser modificada por intercambio isotópico entre agua y roca, o por mezcla de aguas de distinta composición (Pérez Quezadas *et al.*, 2017).

Para el estudio se seleccionó la zona del Dorso Los Chihuidos considerada un área de recarga de los sistemas acuíferos de la región extraandina de la provincia de Neuquén, junto con el volcán Auca Mahuida y la zona de sierra Negra (Gatica, 2017). La recarga se produciría, fundamentalmente, a partir de precipitaciones locales.

Además de la existencia de pobladores que se abastecen de agua subterránea, el creciente desarrollo de la industria hidrocarburífera es el principal motivo del aumento de la demanda. A pesar de esto, la información disponible y el conocimiento sobre las características y el comportamiento de las unidades acuíferas es escaso, por lo que surge la necesidad de contribuir al conocimiento de la recarga y dinámica de las mismas.

El análisis de isótopos ambientales en esta investigación se convirtió en una herramienta de gran utilidad en el diseño del funcionamiento geohidrológico del área y, por primera vez, se emplearon estudios de este tipo en este sector de la cuenca. Esta metodología permitió aportar evidencias al conocimiento del origen y edad del agua y, la vinculación entre los



distintos subsistemas del ámbito subterráneo, facilitando la definición de pautas de uso y protección de recursos hídricos.

Dada la complejidad del sistema estudiado, fue fundamental desarrollar un modelo de funcionamiento hidrogeológico local que permitió revisar las interpretaciones isotópicas e hidroquímica.

Objetivo general

- Evaluar el comportamiento isotópico del agua subterránea para contribuir al conocimiento de la dinámica de los acuíferos en el Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso de la cuenca neuquina en el Dorso Los Chihuidos.

Objetivos específicos

Sobre la base del análisis de la geología y aspectos climáticos, junto con la hidrodinámica del área de estudio, se plantearon los siguientes objetivos:

- Determinar características hidroquímicas e isotópicas de las aguas.
- Realizar inferencia respecto a la recarga.
- Estimar la evolución de las aguas, contemplando origen y mezcla.



2 ANTECEDENTES

Entre la bibliografía clásica que trata principios básicos de la química y de la relación de los minerales con los que el agua subterránea está en contacto, se encuentran Custodio y Llamas (1983), Ven Te Chow *et al.* (1994), Deutsch (1997) y Escuder *et al.* (2009).

Las técnicas isotópicas se han aplicado en hidrología e hidrogeología a nivel mundial desde hace más de 50 años, constituyéndose en una herramienta muy valiosa para la investigación y la solución de problemas relacionados con el medio ambiente y la ingeniería.

Con referencia a las técnicas isotópicas ambientales en el ciclo hidrológico, algunos textos clásicos que merecen ser citados son: Fritz y Fontes (1980), Gat y Gonfiantini (1981), Hoefs (1987), Clark y Fritz (1997), Mook (2002) y Clark (2015). En 1961, Craig encuentra una relación lineal entre la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y la de $\delta^2\text{H}$ para las aguas meteóricas a escala global y la denomina “*Craig’s global meteoric water line*” (Línea de Agua Meteórica Global de Craig). Dansgaard (1964) establece que la composición isotópica media anual de las aguas meteóricas responde a la temperatura del aire, latitud, altitud y continentalidad. La utilidad de los isótopos del agua reside en su eficiencia para identificar distintas fuentes de recarga y origen de aguas subterráneas y mezclas de aguas, debido a que son trazadores ideales ya que forman parte de la molécula de agua y no reaccionan como otros elementos disueltos en el agua. Según explica Fontes (1986), la concentración absoluta y relativa de los iones mayoritarios y traza en el agua reflejan dos situaciones: por un lado, los procesos de interacción agua-roca y, por otro, la composición isotópica de las aguas subterráneas, que puede utilizarse para localizar las zonas de recarga y determinar su origen (meteórico, agua marina, fósil, magmática y metamórfica).

En el país la mayor parte de los trabajos realizados con herramientas isotópicas, contaron con la participación del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS). Bonorino y Panarello (1984) estudiaron isótopos estables del oxígeno en el agua subterránea del acuífero profundo de Bahía Blanca; Panarello y Parica (1984) muestran la aplicación de los estudios del isótopo ^{18}O en hidrología e hidrogeología; Dapeña y Panarello (1995) realizan un balance isotópico ambiental en la laguna Mar Chiquita. En Córdoba; Dapeña *et al.* (2002) realizaron el estudio del origen del agua y mecanismos de recarga en el acuífero del valle argentino en La Pampa a partir de isótopos ambientales; Dapeña y Panarello (2004) estudiaron la composición isotópica de las lluvias de Buenos Aires y, en 2008, los mismos autores estudiaron los isótopos en precipitación para determinar sus aplicaciones en estudios hidrológicos e hidrogeológicos en distintas provincias argentinas. En el año 2009, Cabrera aplicó métodos isotópicos e hidrogeoquímicos para evaluar el sistema acuífero de la falla regional Tigre Muerto en Córdoba. Dapeña y Panarello (2011) investigaron acerca de la composición isotópica de precipitaciones en el noreste del país. Tognoli *et al.* (2018) realizaron aportes al modelo conceptual hidrogeológico de la zona del Abanico de Agrelo en Cuenca Norte, Mendoza, para lo que realizaron un muestreo hidroquímico e isotópico con el fin de corroborar la dinámica hidrológica.

En la década del '60 el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en cooperación con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), estableció una red mundial de estaciones para la colección de muestras mensuales de precipitación llamada “*Global Network for Isotopes in Precipitation*” (GNIP), con el objeto de determinar la composición isotópica de las mismas. El Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS) integra esta red desde 1978 y, estableció una Red Nacional de Colectores de Isótopos en Precipitaciones (RNC) cuya función principal es evaluar la distribución espacial y temporal



del contenido isotópico de las aguas de lluvia y su dependencia con los parámetros meteorológicos (Dapeña y Panarello, 1999, 2002). De las estaciones pertenecientes a esta red nacional, la más cercana al área de estudio es la correspondiente a Bariloche, que podría considerarse la más representativa para la región del Dorso Los Chihuidos.

En la provincia, Fiori y Zalba (2000) elaboraron un plan de manejo para la reserva provincial Auca Mahuida, donde mencionan un estudio hidrogeológico en el Yacimiento El Trapial, en el que se determinó la no existencia de “agua dulce” y, también, señalan que trabajos en acuíferos del Grupo Neuquén indican caudales productivos que varían entre 48 y 86 m³/día y el contenido de sales de esas aguas se encuentra entre 1000 y 7000 mg/L. En el año 2002, Panarello aplicó en el campo geotérmico Copahue- Caviahue, estudios isotópicos e hidrogeoquímicos. Sticco (2014 y 2015) realizó informes con ensayos de bombeo, niveles, calidad química y litología de diferentes pozos de agua ubicados en el área del Dorso de los Chihuidos. De acuerdo a los ensayos realizados, los niveles acuíferos corresponden a las areniscas del Grupo Neuquén y a la sección superior de la Formación Rayoso y la calidad del agua de los mismos se evaluó a partir de análisis de laboratorio.

Además, hay estudios acerca de la calidad de aguas aportando información de las unidades acuíferas en el área de estudio realizados por: Alonso *et al.* (2016) donde definen la hidrogeología de la Fm. Rayoso y Grupo Neuquén, que son las unidades acuíferas del área a estudiar; Bertoni y Dufilho (2016) describen la hidrogeoquímica de los acuíferos presentes y Gatica (2017) mediante Sistemas de Información Geográfica, estima que la recarga de acuíferos de la provincia de Neuquén es una fracción percolada a partir del excedente hídrico en la región extraandina de la provincia, estimado en 750 hm³ anuales.

En cuanto a análisis de isótopos ambientales, Tchilinguirian (2014) realizó un estudio de la hidrogeología del Yacimiento El Trapial, con enfoque en el Grupo Neuquén, en el que utilizó análisis isotópicos de aguas subterráneas y superficiales. Este yacimiento está ubicado en el departamento Pehuenches y, se encuentra aproximadamente unos 70 km al norte del área de análisis.

3 MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO

3.1 Hidrogeología

3.1.1 Ciclo del agua

El ciclo hidrológico, es un modelo conceptual que describe el almacenamiento y movimiento del agua en el planeta (pasa cíclicamente de la atmósfera a la superficie terrestre para volver a la atmósfera) (Fig. 3.1). El agua se almacena en la hidrosfera: océanos (97,5%) y lagos, ríos, suelos, glaciares, atmósfera y aguas subterráneas (2,5%) (Fig. 3.2). Los principales procesos que intervienen son la precipitación, la evaporación, la transpiración, escorrentía e infiltración. La energía solar y la gravedad son los motores de este ciclo.

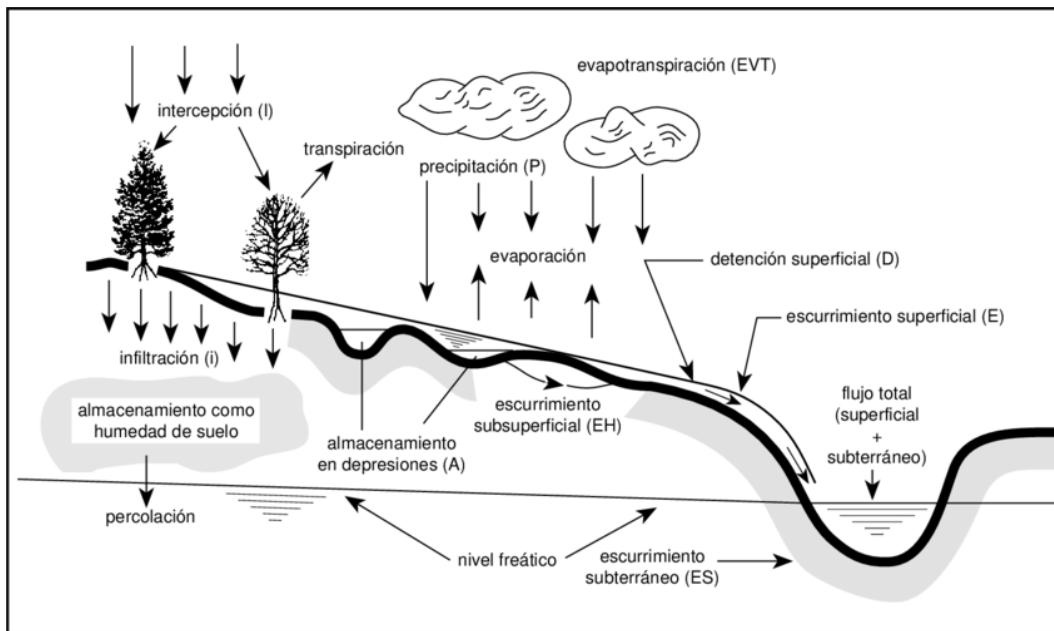


Figura 3.1. Ciclo hidrológico (Vich, 1996).

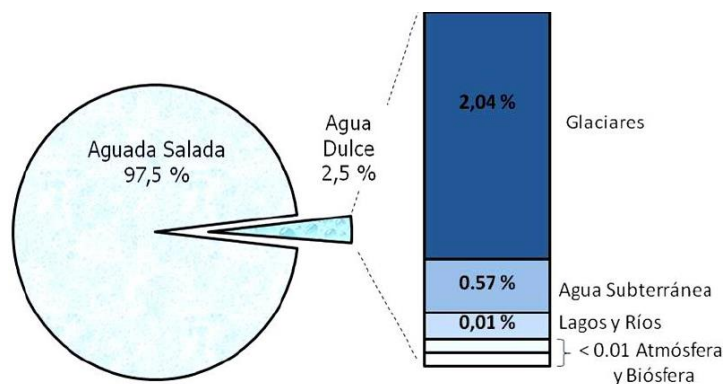


Figura 3.2. Distribución del agua en la Tierra (Alonso, 2016).

3.1.2 Agua subterránea

El agua que penetra y circula a través de los materiales de la corteza (rocas y sedimentos), proviene principalmente de las precipitaciones. Por debajo de la superficie del terreno se distinguen dos zonas con comportamientos hidráulicos diferentes (Fig. 3.3):

- Zona no saturada. También conocida como zona de aireación o vadosa. Se extiende desde la superficie del terreno hasta la superficie freática. En este medio coexisten tres fases: agua, aire y sólido. El agua moja las superficies de los granos de los sólidos y los envuelve mientras que el aire ocupa la parte central de los poros. El agua queda retenida en el suelo como agua higroscópica, capilar y gravitacional. El agua higroscópica queda retenida en la superficie de las partículas del suelo y no se mueve ni por capilaridad ni por influencia de la gravedad; el agua capilar es retenida por partículas sólidas del suelo mediante tensión superficial y, el agua gravitacional o libre, es la que se infiltra por fuerzas de gravedad a las capas más profundas (Navarro Blaya y Navarro García, 2003). Es un efectivo filtro natural frente a los contaminantes, en su recorrido descendente hacia la zona saturada.
- Zona saturada- acuíferos. Se encuentra por debajo de la zona no saturada. Es la extensión de un sistema acuífero en la que todos los huecos o intersticios están llenos de agua, es decir que coexisten sólido (granos) y líquido (agua).

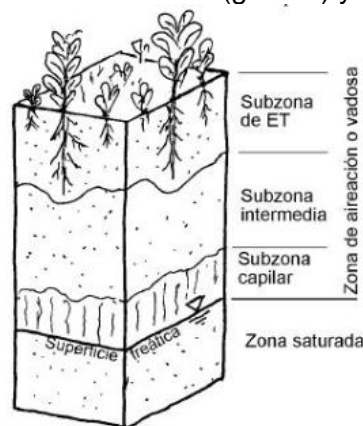


Figura 3.3. Distribución vertical del agua en el suelo (Sánchez San Román, 2012).

La calidad del agua subterránea influye de una manera decisiva, no sólo en la expansión y desarrollo de las actividades humanas, sino que constituye uno de los factores más importantes en la salud de la población, sobre todo en zonas áridas donde constituye la mayor fuente de agua dulce producto de la escasez de fuentes superficiales.

Custodio (1998) define recarga como el proceso por el cual se incorpora a un acuífero un volumen de agua que procede del exterior de sus límites, durante un periodo de tiempo, a causa de la infiltración de precipitaciones, de un curso de agua superficial (embalses, lagos, ríos, etc.), de agua de otros acuíferos y, también, de agua relacionada a actividades antrópicas como, por ejemplo, el riego. Descarga es cuando este volumen de agua infiltrado sale del acuífero por manantiales terrestres, subfluviales o submarinos y, también, por evapotranspiración, si la zona saturada está muy próxima a la superficie.

Una clasificación más detallada acerca del origen de las fuentes de recarga corresponde a Lerner (1990):

1. Recarga directa o recarga difusa, proveniente del agua de lluvia

2. Recarga concentrada o indirecta, producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros
3. Flujos laterales, procedentes de otros acuíferos
4. Retorno de riegos, excesos de riegos o pérdidas en los canales de distribución
5. Recarga urbana, producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado

La recarga natural de los acuíferos, está condicionada por el flujo vertical descendente en la zona no saturada y por el exceso de disponibilidad de agua por encima de la demanda evapotranspirativa. El flujo natural del agua subterránea en una región se esquematiza mediante redes de flujo (Fig.3.4). En las áreas de recarga, el flujo subterráneo presenta una componente vertical descendente y, en las de descarga, ascendente. También, es posible que existan áreas donde el flujo es prácticamente horizontal. Aquellas zonas que no estén expuestas a ningún gradiente se llaman puntos de estancamiento (E). El agua en B procede de un flujo regional (mayor recorrido, mayor tiempo de residencia), por lo que se espera que sea más salina y su composición química puede ser muy diferente a la de A que corresponde a un flujo local (Sánchez San Román, 2012).

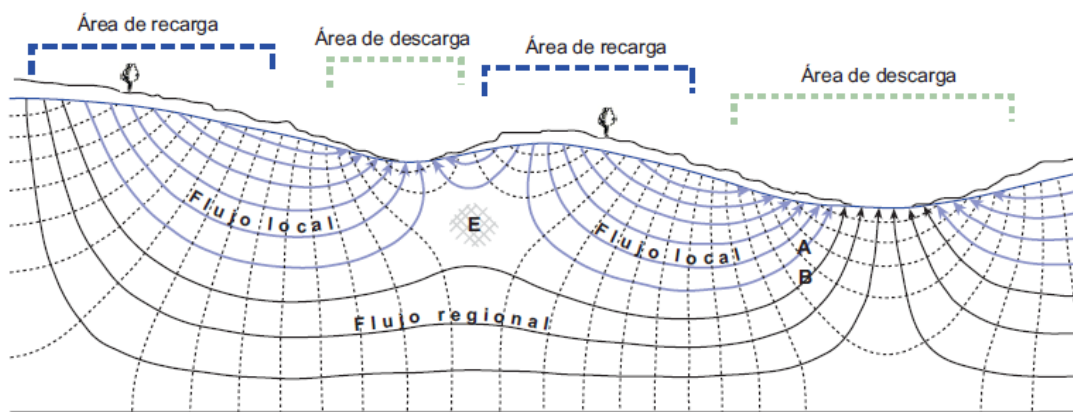


Figura 3.4. Red de flujo que esquematiza el flujo subterráneo natural en una región de conductividad homogénea (Sánchez San Román, 2012).

3.1.3 Clasificación de formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico

Según la aptitud de las formaciones geológicas para almacenar agua, se las puede clasificar en:

- Acuífero: formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad. Por ejemplo, arenas, gravas y rocas compactas altamente fracturadas.
- Acuícludo: formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella. Por ejemplo, limos y arcillas.
- Acuitardo: formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable, pero el agua circula a través de ella con dificultad. Por ejemplo, arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración y/o fracturación moderada.

- **Acuífugo:** formación geológica que se caracteriza por ser impermeable, por lo tanto, es incapaz de absorber o transmitir agua. Por ejemplo, granitos o esquistos inalterados y no fracturados.

3.1.4 Clasificación de los acuíferos según su funcionamiento hidráulico

Se denominan acuíferos libres a aquellos que su límite superior (la superficie freática) está a presión atmosférica. En este caso el agua satura los espacios porosos y puede drenar de forma natural o por bombeo.

En acuíferos confinados el límite superior se encuentra a presión superior a la atmosférica: es una capa impermeable; si extraemos agua de él, ningún poro se vacía, la extracción procede de la descompresión del agua y en menor medida de la compresión de la matriz sólida. Si esa compresión es notoria y no es reversible, llegarán a producirse asentamientos y subsidencia del terreno.

Un caso más frecuente es el de acuíferos cuya presión es mayor a la atmosférica, pero alguna de las capas confinantes es semipermeable o un acuitardo entonces permite la filtración de agua hacia el acuífero, se los denomina acuíferos semiconfinados (Fig. 3.5).

Cuando se trata de formaciones geológicas cuyo funcionamiento hidrogeológico conviene ser considerado en conjunto, se habla de unidad o sistema hidrogeológico. Se los considera de esta forma ya que están conectados entre sí, de modo que sus entradas, salidas y balance deben ser estudiados en conjunto.

Los poros o fisuras del terreno se encuentran saturados hasta un determinado nivel llamado superficie freática, siempre que exista infiltración de las precipitaciones. Es la superficie formada por los puntos con una presión igual a la presión atmosférica, se da en acuíferos libres y adopta, en general, una forma similar a la topografía de la región. En cambio, en los confinados, se forma una superficie virtual con los puntos que alcanzaría el agua si se hicieran perforaciones en el acuífero, que se la denomina superficie piezométrica.

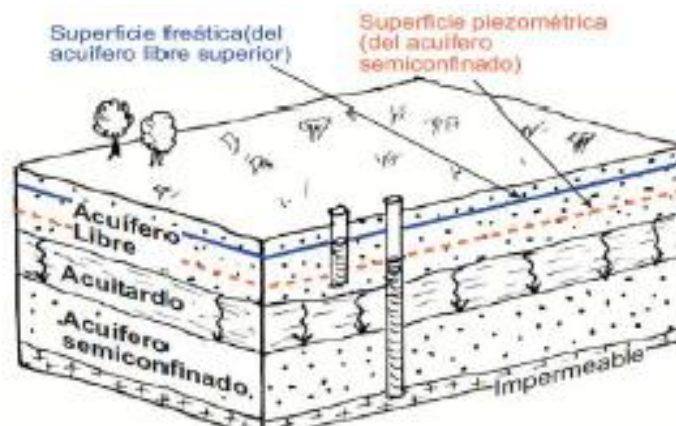


Figura 3.5. Esquema de acuíferos semiconfinados y libres (Sánchez San Román, 2014b).

Además, cuando el nivel freático se encuentra a cierta profundidad y existe un nivel impermeable que lo sustente, se producen acuíferos colgados y son de menores dimensiones que el resto (Fig. 3.6).

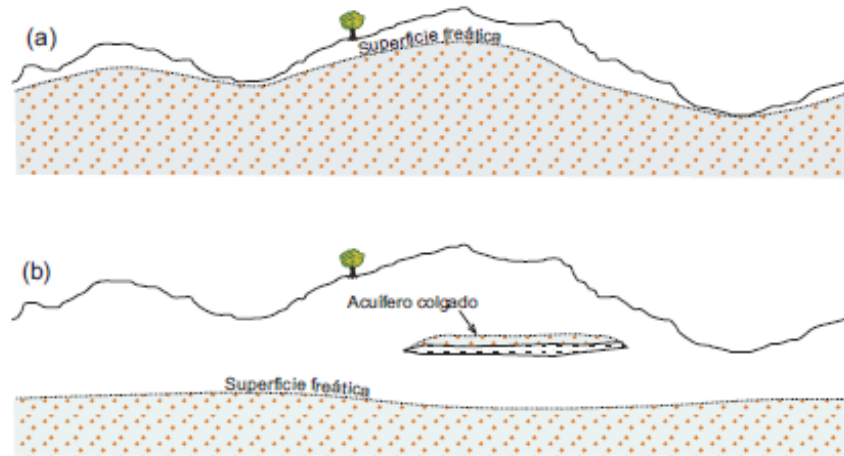


Figura 3.6. a) Superficie freática paralela a la topografía. b) Superficie freática profunda y acuífero colgado (Sánchez San Román, 2014b).

3.2 Características físico-químicas del agua subterránea

La calidad química natural de las aguas subterráneas está condicionada por su origen y por los procesos físico-químicos naturales que se desarrollan en sus diversos recorridos. Generalmente, el origen del agua subterránea es la infiltración de agua de lluvia, la cual contiene gases y iones que están disueltos en la atmósfera. Cuando inicia la infiltración empieza a mineralizarse, manteniendo relación con la litología del acuífero.

En el caso de los acuíferos que están constituidos por rocas sedimentarias, los factores de mineralización que influyen son varios (González de Vallejo *et al.*, 2002):

- Factores litológicos: superficie de contacto roca/agua, granulometría, fases sólidas solubles, agua intersticial y ocluida.
- Factores del agua: pH, Eh, déficit de saturación, presión de vapor de gases disueltos.
- Factores del sistema agua/roca: permeabilidad, longitud del recorrido y tiempo de contacto, régimen de circulación, cambio iónico, difusión y adsorción.
- Factores externos: temperatura, presión, actividad biológica.

En el agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Custodio y Llamas (1983) clasifican los principales constituyentes como:

- Mayoritarios (se encuentran siempre en concentraciones >1 mg/L): bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-), calcio (Ca^{++}), sodio (Na^+), magnesio (Mg^{++}), potasio (K^+).
- Minoritarios (pueden o no estar presentes y se encuentran en concentraciones de 1 a 0,1 mg/L): nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}), borato (BO_3^-), flúor (F^-), sulfuro (S^{2-}), bromuro (Br^-), yoduro (I^-), amonio (NH_4^+), ion ferroso (Fe^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), litio (Li^+), estroncio (Sr^{2+}), zinc (Zn^{2+}), entre muchos otros.



- Elementos traza (si se presentan en concentraciones inferiores a 0,1 mg/L): aluminio (Al^{3+}), titanio (Ti^{4+}), cobalto (Co^{2+}), cobre (Cu^{2+}), plomo (Pb^{2+}), níquel (Ni^{2+}), cromo (Cr^{3+}), arsénico (As), entre otros.

La hidrogeoquímica se encarga de estudiar la química del agua superficial y subterránea, así como las reacciones más importantes que suceden en ella para entender la interacción agua/roca en diferentes condiciones geológicas.

La interpretación de las características físico-químicas se llevó a cabo con información de análisis químicos existentes fundamentalmente del Ente Provincial de Agua y Saneamiento de Neuquén (EPAS) e información disponible en el proyecto de investigación 04/I205 y 04/I243.

Se tomaron muestras de vertientes, pozos y perforaciones en el Dorso Los Chihuidos y, a cada muestra tomada, se le realizó mediciones de parámetros físico- químicos del agua *in situ*. Para el pH y la temperatura, se utilizó un pH-metro ADWA AD12 *Pocket Tester Water proof Multiparametric IP67*, con una precisión de $\text{pH} \pm 0,01$ y de temperatura $\pm 0.5^\circ\text{C}$. La conductividad eléctrica (CE) fue medida con un conductímetro ADWA AD203 Portátil (μS) Standart Pocket Tester, con una precisión de $\pm 2\%$. Cuando fue posible, se realizaron aforos de manera directa, es decir, se midió un volumen en un tiempo. Estos parámetros son definidos por Custodio y Llamas (1983):

Temperatura: se refiere al potencial calorífico referido a un cierto origen. Se mide en grados centígrados ($^\circ\text{C}$). Es una medida que hay que realizar en el campo.

Las aguas subterráneas poco profundas tienen una temperatura muy poco variable y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar. En profundidad el agua subterránea aumenta por gradiente geotérmico, 1°C cada 33 m que se profundice, excepto que se encuentre afectada por procesos tales como magmatismo, adelgazamiento cortical, entre otros.

Conductividad eléctrica: es la capacidad del agua para conducir electricidad. Se mide como la conductividad que existe entre dos electrodos paralelos de 1 cm^2 de superficie cada uno y separados 1 cm situados en el seno del agua a medir de modo que el medio se pueda considerar infinito. Se mide en *microsiemens/cm* ($\mu\text{S/cm}$) o *milisiemens/cm* (mS/cm) y crece con la temperatura y con el contenido de iones disueltos. Su medida es muy sencilla y existen conductímetros portátiles para utilizar en el campo que compensan automáticamente el valor medido a 25°C (temperatura estándar).

pH: coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa. En general, el pH de las aguas naturales está entre 6,5 y 9,5, aunque excepcionalmente puede variar entre 3 y 11, cuando están afectadas por procesos de contaminación. Se determina con un pH-metro o colorimétricamente. Aguas con $\text{pH} < 7$ suelen ser agresivas. $\text{pH} > 9$ genera dificultades en las plantas.

3.2.1 Representación de características químicas del agua

El manejo y estudio de análisis químicos puede simplificarse con el empleo de gráficos y diagramas en especial cuando se trata de hacer comparaciones entre varios análisis de aguas de un mismo lugar en épocas diferentes o de diferentes lugares. Existen múltiples diagramas hidroquímicos como: columnar de Collins, triangular de Piper-Hill-Langelier, circular, poligonal de Stiff, columnar vertical de Schoeller-Berkalof, bidimensionales de dispersión, entre otros. Representar gráficamente los datos permite realizar estimaciones



de la evolución química del agua, su circulación regional y tiempo de residencia en el acuífero.

En este trabajo se realizaron con el programa informático “*Diagrammes v6.5*” los diagramas de Piper- Hill- Langelier y Stiff, que son los más difundidos. Custodio y Llamas (1983) los explican de esta manera:

- Diagrama de Piper- Hill- Langelier

Está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representa en porcentaje, respectivamente, la composición aniónica y catiónica del agua y un campo central romboidal en el que se representa la composición del agua deducida a partir de cationes y aniones. Las concentraciones de los iones se expresan en meq/L.

Es utilizado para visualizar la evolución geoquímica de las aguas, detectar mezclas entre dos tipos de aguas y, junto con cartografía y localización de puntos de muestreo, permite validar o proyectar hipótesis de la localización de la zona de recarga de los acuíferos, entre otras.

- Diagrama de Stiff

Esta gráfica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión con un anión. Todos los ejes están en la misma escala y las concentraciones se dan en meq/L. Los extremos de los segmentos se unen dibujando un polígono cuya forma puede asociarse a un determinado tipo de agua.

Permite visualizar claramente diferentes tipos de agua y, simultáneamente, dar idea del grado de mineralización. Este tipo de diagrama comúnmente se sobrepone a un mapa para observar variaciones espaciales y poder inferir sobre la evolución geoquímica de un agua en la zona bajo estudio.

Complementariamente, con motivo de mejorar la clasificación, se utilizó la clasificación geoquímica de iones dominantes de Custodio (1983), donde 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. Si conviene, se puede añadir el nombre de algún ion menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta.

3.3 Evolución del agua

Desde que el agua alcanza la superficie freática, hasta que sale al exterior ya sea por un río, manantial o captación pueden transcurrir desde días hasta miles de años, y el recorrido puede ser de un kilómetro hasta miles de kilómetros. A lo largo de este recorrido en el tiempo y espacio, ocurren reacciones y procesos químicos muy variados.

Como se observa en la figura 3.7, las aguas de lluvia son, generalmente, cloruradas o sulfatadas y, en el suelo y por interacción con el CO₂ del suelo y por los minerales carbonatados (que son los que predominan), el agua gana rápidamente bicarbonatos.

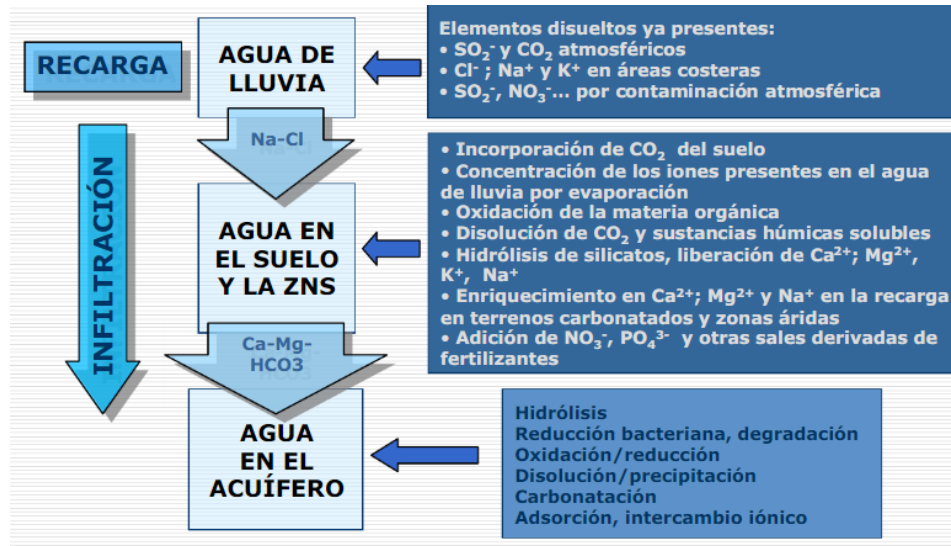


Figura 3.7. Procesos que modifican la composición química del agua (Lillo, 2007).

Entonces, como norma general, se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son bicarbonatadas. Después, predomina el sulfato y, las aguas más salinas, son cloruradas. Esta sucesión debida a la solubilidad y abundancia en el subsuelo de las distintas sales, se denomina secuencia de Chebotarev (Sánchez San Román, 2012) (Fig. 3.8).

	...→ Recorrido y tiempo de permanencia en el acuífero - ...→
Aniones predominantes:	$\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{HCO}_3^- \text{ y } \text{SO}_4^{=}$ → $\text{SO}_4^{=}$ → $\text{SO}_4^{=} \text{-- y } \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}^-$
	...→ Aumento de la salinidad ...→

Figura 3.8. Evolución del agua según la secuencia de Chebotarev (Sánchez San Román, 2012).

La solubilidad de los carbonatos es mucho más baja que la de los sulfatos, que, a su vez, es más baja que la de los cloruros. En el caso de que en el acuífero hubiera muchos minerales clorurados, al ser los más solubles, desde el inicio serían cloruradas. Por otro lado, la evolución hacia aguas cloruradas no es exactamente por la interacción con rocas del subsuelo a la que lo adjudican autores como Árcega Santillán (2010), ya que son muy pocos los minerales que contienen al cloruro para cedérselo al agua. Bibliografías más geoquímicas como Custodio y Llamas (1983) y Escuder *et al.* (2009) adjudican el aumento de los cloruros, en los procesos de evolución geoquímica normal, a que el cloruro es incorporado continuamente por las aguas de recarga y como poseen elevada solubilidad, no alcanza la sobresaturación para que se produzca la precipitación de estas sales, entonces van aumentando progresivamente. En cambio, como los bicarbonatos y sulfatos si alcanzan las concentraciones que los hacen precipitar, precipitan y, por lo tanto, con el tiempo de circulación hay un cambio relativo entre las concentraciones iónicas, lo que hace que el cloruro predomine en las aguas en áreas de descarga, porque ya precipitaron carbonatos y sulfatos.



Además de la solubilidad, la abundancia es también un factor importante. Hace referencia a la diferente probabilidad que existe de que un agua encuentre minerales que le aporten bicarbonatos, sulfatos o cloruros. Si un agua estuviera en contacto simultáneamente desde su infiltración con los minerales que le aportarían todos estos iones, no se produciría la secuencia de Chevotarev, sino que, desde el primer momento, las aguas serían cloruradas, porque que son las sales más solubles (Sánchez San Román, 2012).

3.4 Hidrogeoquímica isotópica

3.4.1 Introducción

A los átomos de un mismo elemento cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones, por lo tanto, distinta masa, se los denomina isótopos.

Las diferencias en la masa atómica provocan diferencias importantes en el comportamiento de los isótopos en los procesos naturales.

3.4.2 ^2H y ^{18}O Los isótopos estables y su comportamiento en el marco del ciclo hidrológico

Tanto el hidrógeno como el oxígeno presentan un conjunto de isótopos, cuyas variaciones en el agua natural son la base para su aplicación metodológica en hidrología y son utilizados ampliamente en esta disciplina (Carretero, 2011).

El hidrógeno, cuyo isótopo de masa 1 es el protio (^1H), aparece en la hidrósfera con una abundancia de 99,985%, y está acompañado del 0,015% del isótopo pesado deuterio (^2H). Se trata de los isótopos estables con mayor diferencia de masa relativa, cuya relación isotópica $^2\text{H}/^1\text{H} \approx 0,00015$. Incluso existe un isótopo más pesado, de masa 3, denominado tritio (^3H), que es inestable.

El oxígeno posee tres isótopos estables, ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O , con abundancias de 99,76; 0,035 y 0,2%, respectivamente. Se considera que el cociente del $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ es $\approx 0,0020$, ya que son los más abundantes, pero pueden tener variaciones dentro de un rango de casi el 100%. A menudo el ^{18}O posee una mayor concentración en los lagos (salinos), que están sujetos a un fuerte grado de evaporación, mientras que en las precipitaciones que tienen lugar en las altitudes altas y en climas fríos, especialmente en la Antártida, el contenido de ^{18}O es inferior. Normalmente, en el ciclo hidrológico de los climas templados se detecta un rango de $^{18}\delta$ que no excede el 30‰ (Mook, 2002).

3.4.3 Fraccionamiento isotópico

La distribución de los isótopos estables entre fases coexistentes se determina mediante la diferencia relativa en la relación entre el isótopo pesado (generalmente el menos abundante) respecto del liviano (generalmente el más abundante) de la muestra respecto a una referencia. Esa diferencia se designa con la letra δ y se expresa en ‰, definiéndose como:

$$\delta\text{‰} = (\text{R}_M - \text{R}_R * 1000) / \text{R}_R$$

Donde δ , es la desviación isotópica en partes por mil; R_M , es la relación isotópica ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de la muestra y R_R la relación isotópica respecto a un patrón. De esta manera, se desprende que un valor positivo de $\delta^{18}\text{O}$ o de $\delta^2\text{H}$ significa que en contenido de ^{18}O o ^2H



de la muestra es mayor que el del patrón resultando una muestra enriquecida en isótopos pesados, y un valor negativo indica lo contrario, siendo una muestra empobrecida.

El valor standard aceptado para los isótopos en el agua es el VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), el cual es similar al valor standard original SMOW definido por Craig (1971).

Las variaciones en la abundancia relativa de los isótopos entre un estado inicial y uno final, causada por transporte o por la reacción preferencial de uno de ellos es conocida como fraccionamiento isotópico. Si bien las reacciones químicas, físicas y biológicas son las mismas, ocurren a distintas velocidades por la diferencia en el peso molecular, y es por esto que las relaciones isotópicas varían.

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 con menor intensidad otros fenómenos de tipo de difusión térmica, biológicos, etc. (Custodio y Llamas, 1983).

Dansgaard (1964) estableció que la composición isotópica media anual de las aguas meteóricas está fuertemente relacionada con la temperatura del aire media anual, que a su vez es función de la latitud y altitud. Asimismo, comprobó la relación con la cantidad de precipitación y la penetración de los frentes de humedad dentro del continente. Denominó a estas variaciones como “efectos”, de altitud, latitud, continentalidad y estacionales.

- Altitud: la disminución de la temperatura con la altitud hace que en una cierta región la lluvia de zonas topográficamente más altas sea más ligera que en las zonas más bajas. En condiciones geográficas apropiadas se puede llegar a establecer una relación entre la composición isotópica y la altitud. A medida que la masa de aire asciende, las precipitaciones serán más livianas, ya que las primeras en condensar y “llover” serán las moléculas más pesadas. Así, se observarán valores más empobrecidos a medida que aumenta la altitud.
- Latitud: el fraccionamiento isotópico aumenta con la disminución de la temperatura (Dansgaard, 1964). Al aumentar la latitud, la temperatura es menor y se produce un vapor más ligero que en las zonas más cálidas, aunque existe una notable dependencia de las situaciones y de las condiciones climáticas locales. En los polos, las lluvias son isotópicamente más empobrecidas que en el Ecuador. Las aguas meteóricas resultan generalmente empobrecidas en isótopos pesados respecto a las aguas oceánicas. En zonas áridas se pueden encontrar aguas subterráneas más livianas que las de la lluvia en cualquier zona de recarga.
- Continentalidad: moléculas más pesadas precipitan primero al ir avanzando hacia el interior del continente, entonces se genera un vapor residual más liviano a medida que avanza el frente de humedad, originando lluvias cada vez más livianas (menor δ) respecto a las generadas cerca de la costa.
- Estacionales: variaciones isotópicas estacionales por los cambios de temperatura, siendo las precipitaciones más ligeras en invierno que en verano. Este efecto puede ocurrir en cualquier latitud.

Tanto oxígeno como hidrógeno se fraccionan en los cambios de estado del agua. El hidrógeno exhibe el mayor fraccionamiento isotópico, porque es el que más diferencia de masa presenta entre el isótopo liviano (^1H) y el pesado (^2H). La especie molecular más

abundante del agua está formada por dos átomos de protio y un átomo de oxígeno de masa 16 (${}^1\text{H}{}^1\text{H}{}^{16}\text{O}$). Además, existen otras especies más pesadas que incorporan un átomo de deuterio (${}^2\text{H}$) o de oxígeno 18 (${}^{18}\text{O}$), conocidas como “agua pesada”.

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 $\delta^2\text{H}$ (Fig. 3.9). Este análisis se basa en que en durante la evaporación en condiciones de equilibrio la relación es $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ (círculo 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 Meteorológica Mundial (LMM) o *Global Meteoric Water Line* (GMWL) en sus siglas en inglés.

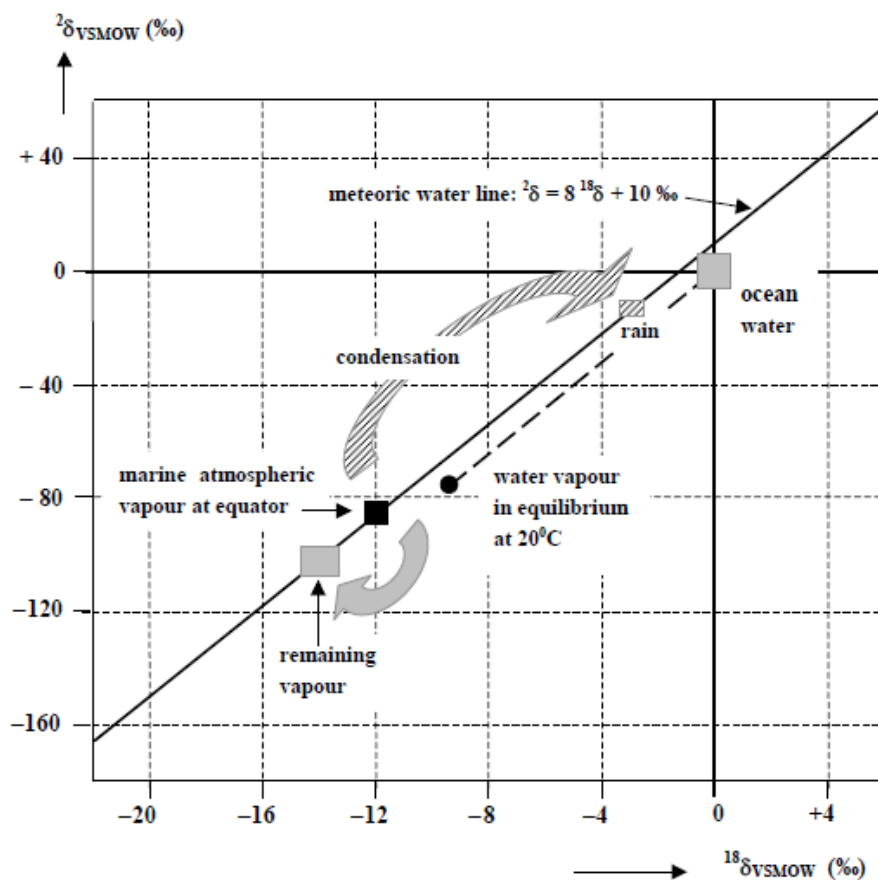


Figura 3.9. Relación entre las variaciones naturales de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua oceánica, el vapor atmosférico y la precipitación. El círculo negro representa el valor hipotético del vapor de agua en equilibrio isotópico con el agua del mar, el cuadrado negro la composición isotópica observada en el vapor oceánico del Ecuador, que se origina a partir del fraccionamiento más realista que se da fuera del equilibrio. El vapor marino se condensa gradualmente para dar lugar a la precipitación (flecha rayada) mediante un fraccionamiento positivo, haciendo que el vapor se vaya empobreciendo progresivamente del ${}^{18}\text{O}$ y el ${}^2\text{H}$ (flecha gris) (Mook, 2002).

La pendiente y la ordenada al origen de la recta dependen del origen e historia previa de la masa de aire, estación climática, altitud y latitud, características climáticas, etc. En la figura

3.10 se muestra la Línea Meteórica Mundial comparada con los cambios de la composición isotópica del agua producida por diferentes procesos.

Cuando se produce la evaporación de aguas superficiales, en general, no se está en condiciones de equilibrio dinámico y el agua residual se enriquece en $\delta^{18}\text{O}$ más que en $\delta^2\text{H}$, así, los puntos representativos de la composición isotópica formarán una recta cuya pendiente está entre 4 y 6 en el caso de intensa evaporación y valores de la ordenada menores a 10 (Plata, 1996; Domenico y Schwartz, 1998; Mebus, 2000). ^{18}O y ^2H están más enriquecidas en las regiones más cálidas y empobrecidas en las regiones más frías (con diferencias de $\delta^{18}\text{O}$ de más de 40‰ y diferencias de $\delta^2\text{H}$ que alcanzan más de 300‰), indicando que la causa más común de enriquecimiento isotópico del agua es por evaporación.

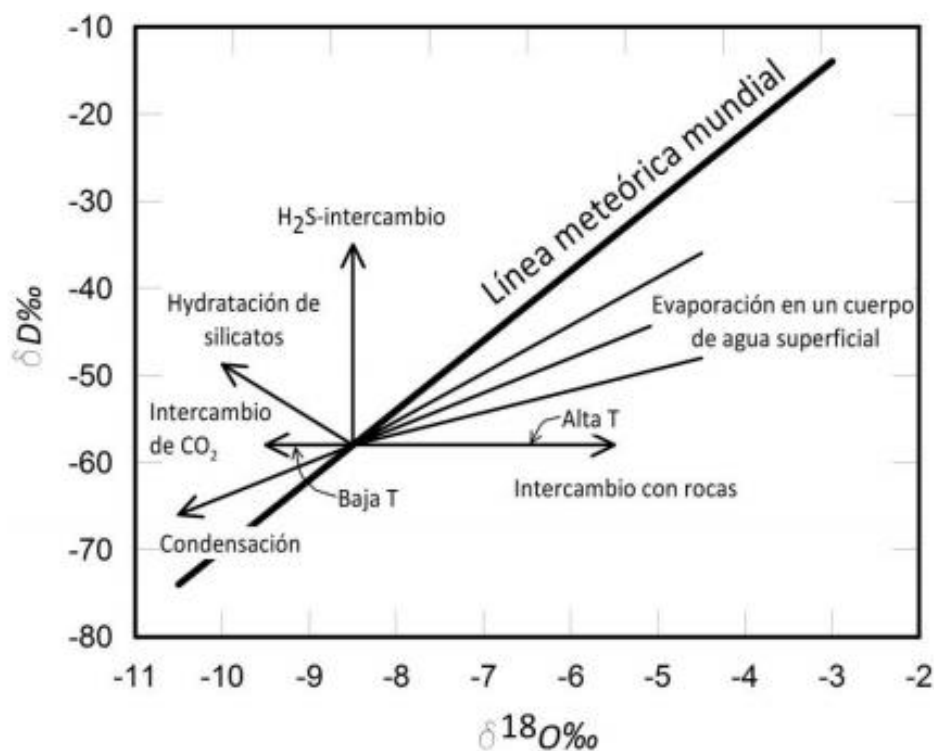


Figura 3.10. Línea meteórica mundial comparada con los cambios de la composición isotópica del agua producida por diferentes procesos (Valenzuela et al., 2013).

Agua de vertientes, pozos y perforaciones en el Dorso Los Chihuidos fueron muestreadas con el fin de realizar un análisis isotópico. Fueron tomadas siguiendo el método de muestreo propuesto por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), que indica la toma de muestras en botellas de polietileno de alta densidad, con cuellos estrechos y tapas con cierres positivos. El volumen de las botellas para los análisis de ^2H y ^{18}O debe ser al menos de 50 ml (Mook, 2002). En nuestro caso, se utilizaron botellas de 500 ml. Las muestras deben mantenerse selladas para evitar la evaporación y, se recomienda llenar la botella hasta el tope, preservar en ambiente fresco y enviar urgente al laboratorio (Clark, 2015).

Los isótopos se determinaron con el método de Espectroscopía Láser (OA- ICOS: *Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy*) para analizar $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ y $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ en el laboratorio del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS). Allí, trabajan con una incertidumbre de $\pm 0,3\%$ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\pm 1,0\%$ para $\delta^2\text{D}$. De esta manera, se obtiene la relación

$\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$, que se analiza mediante un gráfico de regresión realizado con el programa *Excel* en el que se representan los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en función de los correspondientes a $\delta^2\text{H}$.

Para complementar la interpretación de estos isótopos estables, se calcularon los excesos de deuterio “d” para cada muestra, dado que la interpretación de este parámetro es de interés para ver el origen de las precipitaciones. “d” se calcula a partir de la fórmula de fraccionamiento:

$$d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$$

Aquí “d” es la ordenada al origen, es un parámetro inherente al vapor original y es la propiedad más útil para caracterizar el origen del mismo. Además, permite diferenciar procesos que se desarrollaron en equilibrio isotópico de aquellos que no lo hicieron (Dapeña y Panarello, 2008b). 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).

3.5 Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una importante herramienta en las tareas de planificación ambiental, ordenamiento territorial y resolución de problemas socioeconómicos. Actualmente, el término SIG está ampliamente difundido tanto en la geografía como en otras ciencias y, existen tantas definiciones como especialistas que usan SIG.

National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) de los Estados Unidos propone como definición: “*Un SIG es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación*”. Es decir, es un sistema informático para gestionar datos espaciales con coordenadas geográficas conocidas y un conjunto de operaciones para operar y analizar los datos (Lucioni, 2014).

Existen dos formas de representar las unidades espaciales: el modelo raster y el vectorial. El primero, consiste en celdas con información que permiten realizar operaciones de parámetros complejos en la hidrogeología, almacenando la información regularmente en unidades predefinidas a las que se les asocia un valor que corresponde a la variable estudiada. El segundo, lo hace mediante formas geométricas: puntos (localidades, pozos, vertientes), líneas (camino, rutas, redes de drenaje) o polígonos (provincias, lagos, suelos, vegetación).

En la provincia del Neuquén estos sistemas han sido utilizados por el estado como una herramienta imprescindible para la resolución de problemas de planificación y gestión territorial. Dufilho *et al.* (2002) elaboraron las Bases para el Ordenamiento Territorial Ambiental de la provincia del Neuquén (SIG-OTA) y, en la actualidad, COPADE es la encargada de actualizar esta información.

En este trabajo, los datos, tanto vectoriales como raster, fueron trabajados mediante un único sistema de coordenadas planas. Se empleó el marco de referencia geodésico nacional Posiciones Geodésicas Argentinas (POSGAR 94) del año 1994, faja N°2.



Se utilizó el software *ArcGIS (ArcMap 10.5)*, imágenes satelitales y *Google Earth* para diseñar la red de relevamiento de los sitios de interés para el muestreo isotópico: parajes, cursos de agua, vertientes, lagunas, escuelas. Además, fue empleado para generar la cartografía geohidrológica e isotópica a escala 1:250.000.

4 CARACTERIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1 Ubicación geográfica

El área bajo análisis comprende la región del Dorso Los Chihuidos, ubicado en el sector centro occidental de la Cuenca Neuquina en la denominada región del Engolfamiento Neuquino, en el departamento de Añelo, provincia de Neuquén (Fig. 4.1). Constituye una superficie aproximada de 2100km², a unos 70 km al este del meridiano 70°30' O y 10 km al sur del paralelo 38° S. El Volcán Auca Mahuida se localiza al noreste, el Bajo de Añelo al este y el Río Neuquén al oeste y sur.

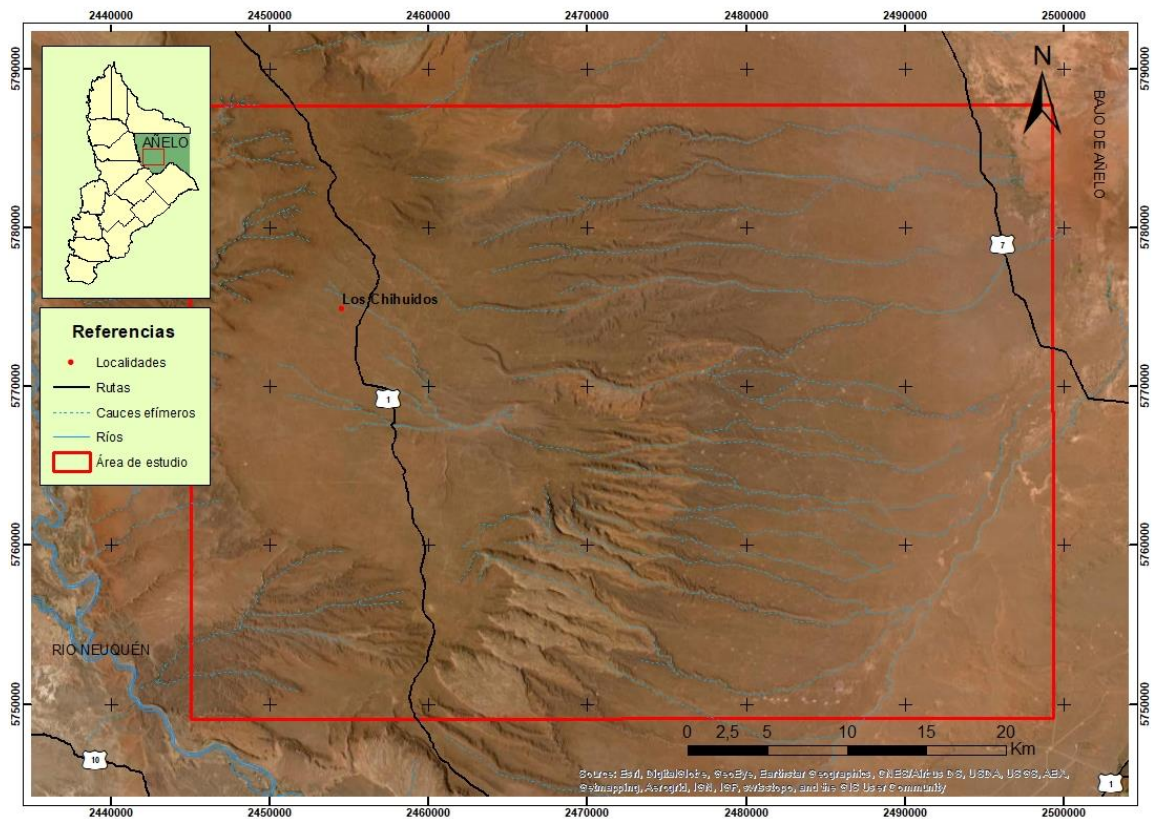


Figura 4.1. Ubicación del área de estudio (Sistema de coordenadas PosGAR 94).

4.2 Clima

La provincia del Neuquén presenta una importante heterogeneidad climática natural que viene dada principalmente por los gradientes climáticos asociados a las temperaturas y a las precipitaciones. En el primer caso se relaciona con la altimetría, con menores temperaturas a medida que la altura es mayor y, en el segundo caso, a la variación en sentido oeste-este que presentan las precipitaciones, las cuales son abundantes en la zona cordillerana próxima al límite con Chile disminuyendo su intensidad abruptamente hacia el este, presentando además desigual distribución a lo largo del año.

Al este del meridiano 70° 30' O, la precipitación media anual es de 200 mm e incluso, llegan a ser menores a 150 mm. Las temperaturas medias anuales están comprendidas entre 14° y 12° C. La zona estudiada se caracteriza por tener un marcado déficit hídrico anual (Pereyra *et al.*, 2011). Sin embargo, como lo indica la figura 4.2, ocurre que la distribución de las precipitaciones no es homogénea, sino que las mayores láminas se producen en otoño e invierno, cuando la evapotranspiración es baja, lo que permitiría intervalos de excedentes hídricos que podrían recargar los acuíferos en períodos más cortos.

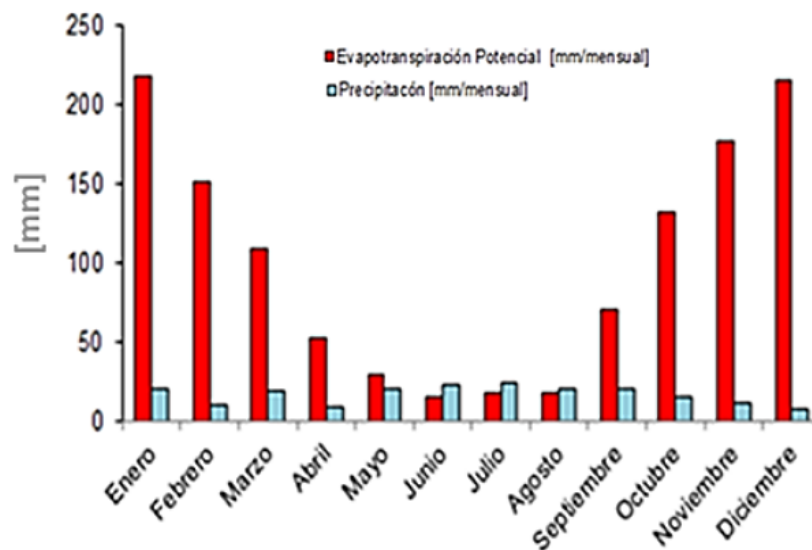


Figura 4.2. Precipitación (mm) vs Evapotranspiración potencial (mm), obtenido mediante datos climáticos del interpolador climático LocClim (Gatica, 2017).

4.3 Suelo

Los suelos predominantes en la provincia son del orden entisoles (Fig. 4.3), ocupando el 35% de su superficie. Se caracterizan por un escaso a nulo grado de desarrollo pedogenético, carecen de horizontes diagnósticos por lo que el perfil A/C es el más característico del orden y sus propiedades están fuertemente determinadas (heredadas) por los materiales parentales. En general, aparecen en zonas donde la escorrentía no permite la evolución de los suelos en profundidad a causa de la erosión hídrica, como en zonas de taludes, pendientes controladas por remoción en masa, terrazas fluviales recientes, planicies aluviales y, también, en zonas de barrancos con aluviones constantes que no permiten el desarrollo en profundidad (Ibañez *et.al.*, 2011).

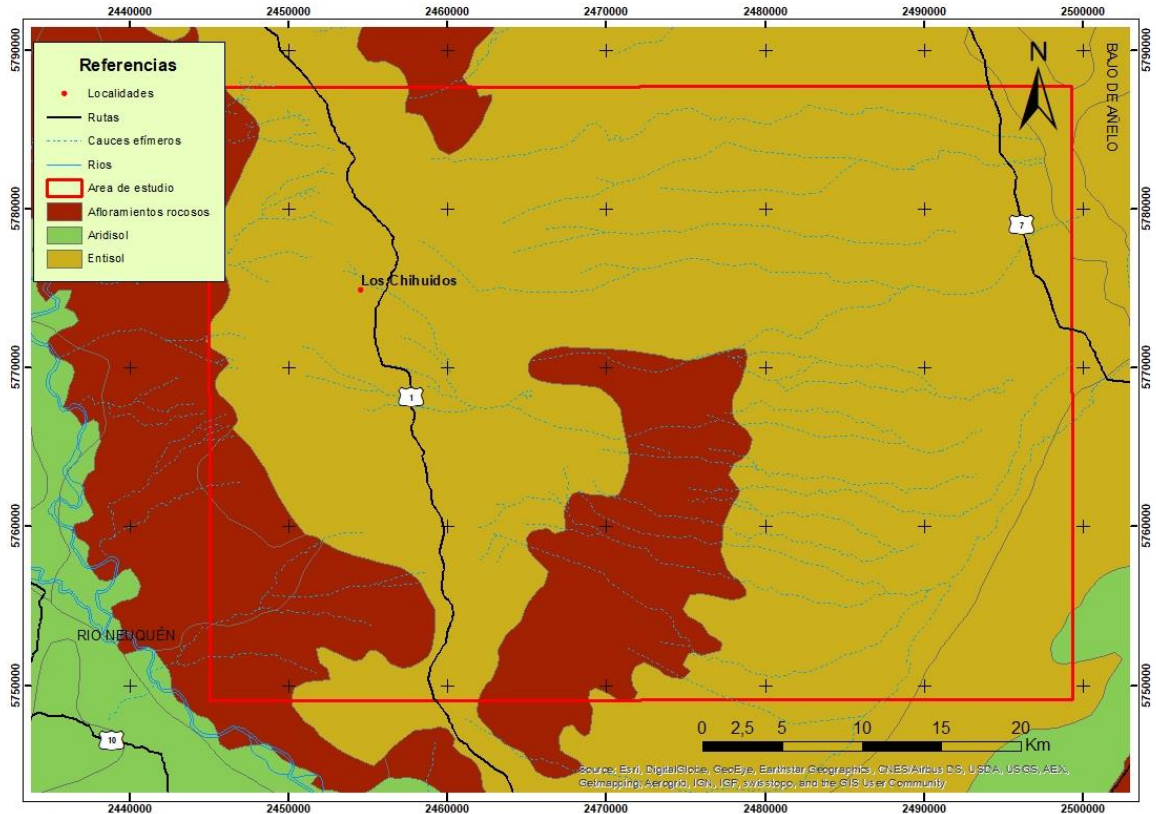


Figura 4.3. Principales ordenes de suelo. Fuente: Irisarri (2006).

4.4 Vegetación

En el área de estudio predomina la estepa arbustiva, le sigue la estepa herbácea arbustiva y los mosaicos (Fig. 4.4). La primera, se encuentra en áreas con suelos poco desarrollados y precipitaciones que están por debajo de los 200 mm anuales, dominando los arbustos bajos de 1,5 a 2 m de altura, de hojas pequeñas y permanentes, distribuyéndose espaciadamente dejando una gran porción del suelo desnudo. Las especies predominantes son matasebo (*Monthea Aphylla*), jarilla (*Larrea Cunefolia* y *Divaricata*) y alpataco (*Prosopis Alpataco*). En cuanto a la estepa herbácea arbustiva, está presente en áreas con precipitaciones que superan los 200 mm anuales, en la zona más elevada del Dorso. Esta vegetación cubre del 20 al 40% de la superficie del suelo, siendo las especies más comunes las gramíneas de hojas duras y el neneo, cuyos nombres científicos son *Stipa Speciosa* y *Mulinum Spionosu* respectivamente.

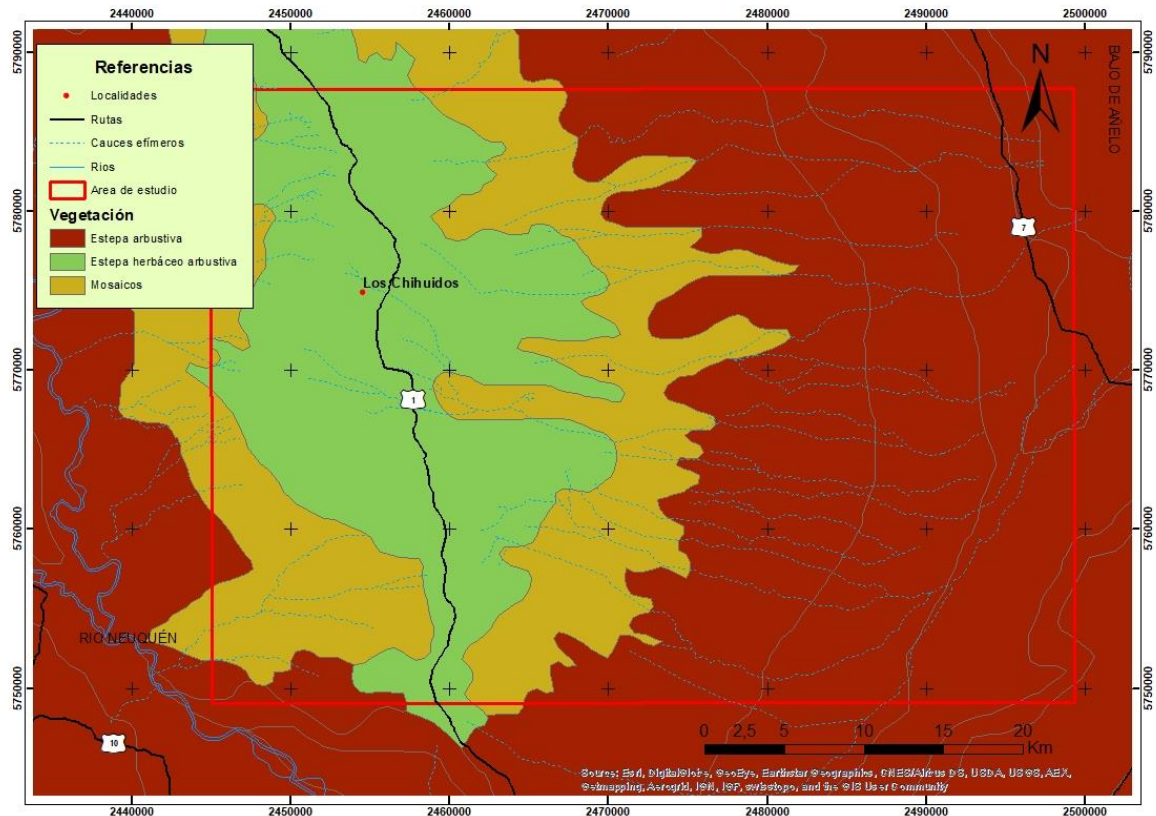


Figura 4.4. Estructuras fisionómicas de la vegetación. Fuente: Movia et al. (2007).

4.5 Geología Dorso Los Chihuidos

Es una estructura anticlinoria de 100 km de longitud, de gran radio de curvatura, con eje aproximadamente norte – sur, buzante al norte y al sur, conocido también bajo el nombre de Alto de Los Chihuidos.

Leanza *et al.* (2001) describe que su flanco occidental es empinado, produciéndose luego una horizontalización, en tanto que el flanco oriental posee una suave inclinación hacia el este (2 a 3°) y, por ende, es más ampliamente extendido. Proponen su origen en procesos de inversión tectónica controladas por anisotropías previas del basamento, es decir, un antiguo sistema de fallas normales responsables del proceso de extensión previo que experimentó la región y que dio lugar a la generación de la cuenca.

Su morfología actual se debe a los últimos movimientos del Ciclo Ándico en el Neógeno y sus pulsos más jóvenes e intensos en el Mioceno, provocaron su exhumación y erosión de más de 2,5 km de sedimento (Zamora Valcarce *et al.* 2009).

La estratigrafía en este sector de la Cuenca Neuquina comprende, desde sedimentitas de rift asignados al Grupo Precuyo hasta depósitos recientes.

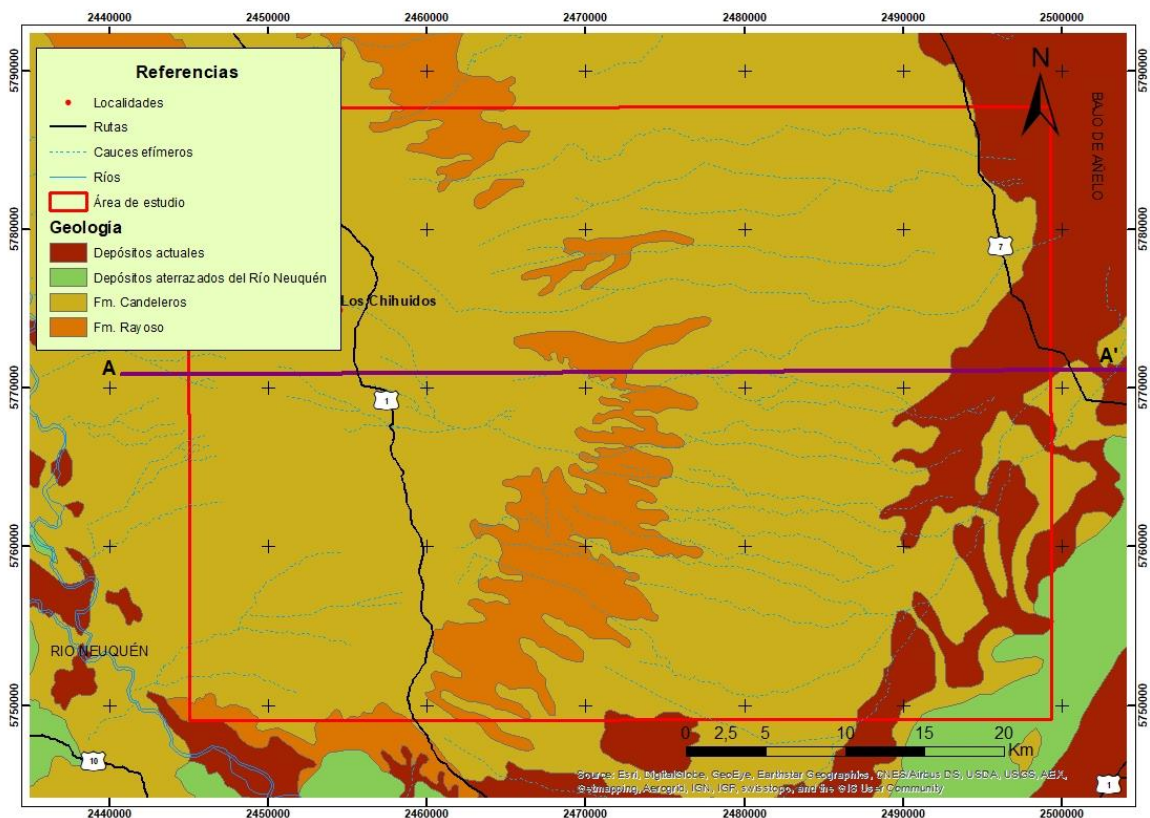


Figura 4.5. Unidades litoestratigráficas. Fuente: Copade (2002).

De oeste a este en el Dorso Los Chihuidos afloran Fm. Candeleros (Gr. Neuquén), Fm. Rayoso y, nuevamente Fm. Candeleros, que tiene un espesor aproximado de 200 a 250 m en el sector central del área de estudio (Fig. 4.5). La Fm. Candeleros se apoya sobre la Fm. Rayoso (Mb. Cañadón de la Zorra o Mb. Pichi Neuquén) mediante una discordancia regional (Intersenoniana) (Giusano *et al.* 2014).

4.5.1 Unidades estratigráficas con interés hidrogeológico: Fm. Rayoso y Grupo Neuquén

La Fm. Rayoso, definida por Herrero Ducloux en 1946, corresponde a una unidad clástica-evaporítica acumulada en un ambiente predominantemente continental, depositada durante el Cretácico temprano (Albiano tardío- Cenomaniano medio) que marca la desconexión de la Cuenca Neuquina con el Pacífico. Zavala y Ponce (2011) indican que se habría depositado en un cuerpo lacustre somero y perenne de salinidad variable, en el cual alternaban períodos húmedos y de extrema aridez.

Posee una distribución aproximada de 15.000 km² y hasta 1200 m de espesor en el centro oeste de la cuenca. Internamente está compuesta por pelitas, areniscas medias a finas y, en menor proporción, niveles evaporíticos, los cuales Uliana *et al.* (1975) relaciona con sistemas fluviales efímeros con extensos barreales y llanuras de inundación asociadas. El espesor en el sector sur del Dorso Los Chihuidos disminuye de oeste a este.

Según Herrero Ducloux (1947, p 171) “La Formación Rayoso se inicia con un grupo de espesor variable constituido por arcillas varicolores, blandas, con intercalaciones de yeso y

ocasionalmente bancos de sal, sigue luego una sección sumamente arenosa formada por gruesos bancos de areniscas rojizas o rojo amarillentas, con estratificación entrecruzada, y finalmente encontramos una sección, por lo menos tan espesa como la suma de las dos anteriores en la que predominan las arcillas rojas”, él fue quien interpretó la formación como «...todo el conjunto de capas que siguen en concordancia sobre el Yeso de Transición y que hacia arriba están limitadas por la discordancia Intersenoniana».

En este trabajo se seguirá el criterio litoestratigráfico utilizado por Leanza (2003), quien sostiene que esta unidad incluye a los miembros Salina, Rincón, QuiliMalal, Pichi Neuquén y Cañadón de la Zorra tal como se ilustra en la figura 4.6 que, además, presenta diferentes criterios de clasificación para otros autores.

Bancos calcáreos de la Mb. La Tosca, perteneciente a la Fm. Huitrín, están por debajo con un contacto neto y, por encima, la Fm. Candeleros (Grupo Neuquén) mediante la ya nombrada discordancia Intersenoniana, donde el rasgo de la angularidad se observa tanto en subsuelo como en afloramientos.

Grober (1946)	Herrero Ducloux (1946)	Uliana, Dellapé y Pando (1975)	Legarreta & Boll (1982)	Leanza (2003)	Zavala et al. (2006), este trabajo.						
Neuqueniano	Formación del Neuquén	Grupo Neuquén	Grupo Neuquén	Grupo Neuquén	Grupo Neuquén						
DIAMANTIANO Rinconense Salinense Tosquense Troncossense Chorreadense Agrioense	Formación Rayoso	Grupo Rayoso Fm. Cañadón de la Zorra Fm. Ranquiles Mb. Pichi Neuquén Mb. Quili Malal Mb. Rincón Mb. Salina	Formación Rayoso sección clástica sección evaporítica	Formación Rayoso Mb. Cañadón de la zorra Mb. Pichi Neuquén Mb. Quili Malal Mb. Rincón Mb. Salina	Formación Rayoso Secuencia R3 Secuencia R2 Secuencia R1						
						HUITRINIANO Fm. Huitrín Fm. AGRIO	"Yeso de transición" Fm. Huitrín Fm. AGRIO	Formación Agrio Fm. Huitrín Miembro La Tosca Miembro Troncoso Miembro Chorreado Fm. Agrio	Formación Huitrín Miembro La Tosca Miembro Troncoso Miembro Chorreado Formación Agrio	Formación Huitrín Miembro La Tosca Miembro Troncoso Formación Agrio	Formación Huitrín Miembro La Tosca Miembro Troncoso Formación Agrio

Figura 4.6. Cuadro estratigráfico y de equivalencias de nomenclatura de la Fm. Rayoso (Zavala y Ponce, 2011).

Las principales características litológicas de los miembros de la Fm. Rayoso son:

- Mb. Salina: arcilitas varicolores con niveles yesíferos de aspecto bandeado.
- Mb. Rincón: areniscas castaño rojizas alternadas con fangolitas rojas.
- Mb. QuiliMalal: arcilitas varicolores con niveles yesíferos y aspecto bandeado.
- Mb. Pichi Neuquén: areniscas y fangolitas rojas.
- Mb. Cañadón de la Zorra: arcilitas rojas y anaranjadas con bancos de yeso y margas, también algunos lentes de areniscas.

Garrido (2011) asigna como edad del Grupo Neuquén el Cenomaniano temprano hasta Campaniano medio. Sin embargo, Calvo y Rivera (2017) confirman, en base a discontinuidades estratigráficas y utilizando datos de antigüedad U/Pb de los detritus de

zircón, que la base del Grupo Neuquén corresponde al período Albiano – Cenomaniano. Los autores coinciden en que se trata de una sucesión de depósitos continentales fluviales, eólicos y lacustres somero, que alcanza 1.200 m de espesor máximo (Fig. 4.7).

La depositación del Grupo Neuquén se encuentra vinculada al inicio de la fase de antepaís de la Cuenca Neuquina, originada como consecuencia de una tectónica compresional sobre el margen andino acaecida a fines del Cretácico Inferior (Tunik *et al.* 2010). Producto de esta fase compresional se produjo la inversión de las antiguas estructuras extensionales de la cuenca (Mpodosis y Ramos, 1989; Macdonald *et al.*, 2003). Estos eventos quedan evidenciados en la discordancia angular y/o erosiva que da inicio a la unidad.

Garrido (2011) explica que la culminación de este ciclo sedimentario está vinculada al desarrollo de un importante arco magmático occidental asociado a una fuerte subsidencia de la cuenca, lo que dio la posibilidad de invertir la pendiente regional y el ingreso del océano Atlántico a la Cuenca Neuquina hacia mediados del Campaniano. Aquí, es cuando se genera la discordancia regional erosiva Huantraica, ubicada en el techo del grupo Neuquén.

	Edad	Ma	Grupo	Sub-grupo	Formación
C r e t á c i c o	Campaniano	84	N e u q u é n	R i o C o l o r a d o	Anacleto
	Santoniano			Bajo de la Carpa	
	Coniaciano	86		R i o N e u q u é n	Plottier
				Portezuelo	
	Turoniano	89		R i o L i m a y	Lisandro
	Cenomaniano	94			Huincul
	Albiano	100			Candeleros
		112			

Figura 4.7. Esquema litoestratigráfico del Grupo Neuquén (Calvo y Rivera, 2017).

Las unidades presentes en el Dorso Los Chihuidos presentan las siguientes litologías:

- Subgrupo Río Limay:
 - Fm. Candeleros: Conglomerados y areniscas rojo violáceos de grano grueso y escasa selección, con clastos subredondeados a subangulosos y apreciable contenido de matriz y cemento calcáreo distribuido irregularmente. Además, hay paquetes de conglomerados polimícticos y areniscas conglomerádicas.

El esquema de la Fig. 4.8 muestra un perfil geológico esquemático del Dorso de los Chihuidos en sentido oeste este.

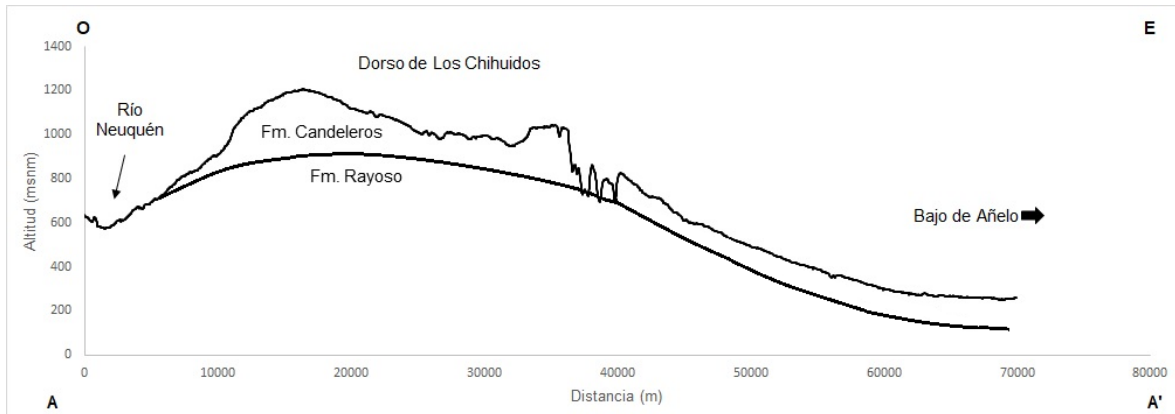


Figura 4.8. Perfil geológico oeste a este en el centro del área de estudio (línea AA' en fig. 4.5).

4.6 Geomorfología

El paisaje regional se muestra como un *plateau* elevado, con ondulaciones y fallas longitudinales, también domos y accidentes tectónicos menores. Se observan además los "chihuidos" que coronan la superficie monótona de la estructura. La altura máxima se encuentra entre los 1200 y 1300 msnm en la zona norte del área de estudio (Fig. 4.9 A). Disminuye rápidamente hacia el Río Neuquén al oeste y, suavemente hacia el Bajo de Añelo al este. La pendiente dominante es leve con excepción de las "cárceles" representadas en la Fig. 4.9 B en color rojo con pendientes entre 44% y 88%,

"Las cárceles" forman un rasgo peculiar del relieve en los flancos del Dorso Los Chihuidos. Rodríguez (1990), indica que estas depresiones de paredes verticales que descienden por los flancos del anticlinal, fueron originadas por la existencia de una estructura tectónica de grandes dimensiones, como lo es el anticlinal; la litología contrastante que permitió la erosión diferencial; el control climático durante el Cuaternario que desarrolló un sistema de erosión esencialmente fluvial en un ambiente árido.

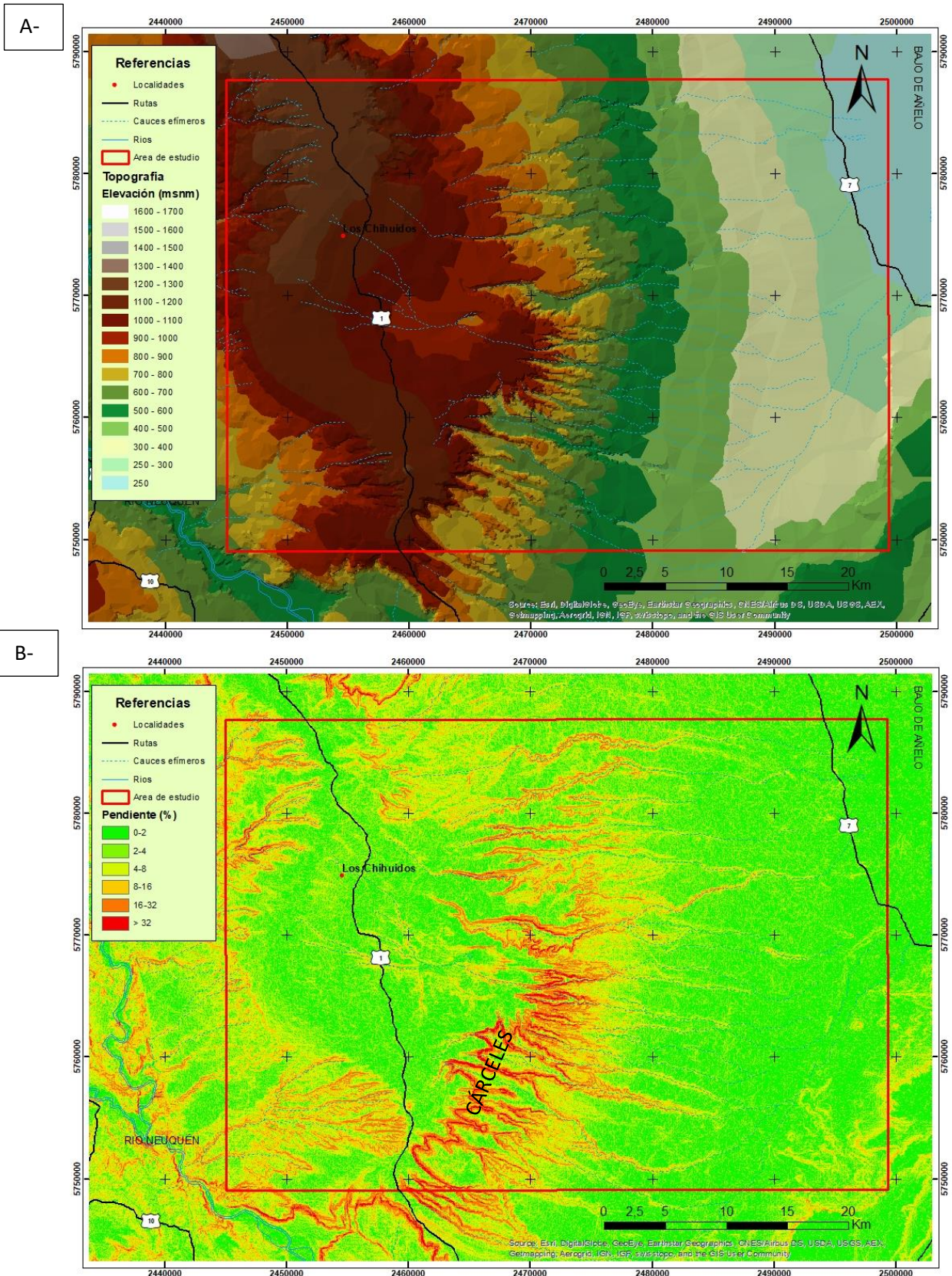


Figura 4.9. Pisos altitudinales (A) y pendientes (B) en el Dorso Los Chihuidos

4.7 Hidrología superficial y subterránea

El Dorso Los Chihuidos se localiza en la margen izquierda del río Neuquén, que nace en el norte de la provincia del Neuquén y recorre una distancia de 540 km desde sus nacientes hasta la confluencia con el río Limay. Posee un régimen irregular de tipo pluvio-nival, un caudal medio de 310 m³/seg, presentando oscilaciones muy dispares según años secos o húmedos.

Los ríos efímeros que drenan en la terminación sureste del dorso se unen a un colector que se desvía por imposición de los depósitos pleistocenos del río Neuquén disponiéndose subparalelo a éste e indicando un levantamiento importante post-Pleistoceno (Cristallini *et al.*, 2005). Este cauce desemboca en el Bajo de Añelo, que es el área de descarga. En cambio, aquellos que drenan al oeste, se unen al cauce del Río Neuquén, el cual podría interpretarse como área de recarga para el acuífero de Fm. Rayoso en la zona sur, donde el río atraviesa la formación.

En esta región árida, las reservas subterráneas profundas más importantes pertenecen a los depósitos clásticos del Cretácico de la cubierta sedimentaria de la Cuenca Neuquina, correspondiente a Fm. Rayoso (Leanza, 2003) y Grupo Neuquén (Fm. Candeleros) (Garrido, 2011) y son el principal recurso hídrico subterráneo de la cuenca, luego de los acuíferos de las llanuras aluviales de los ríos Neuquén, Limay y Colorado y del acuífero de la Fm. La Bardita en Zapala.

El Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso es un extenso complejo regional de areniscas y conglomerados interconectados, irregularmente separados por acuitardos y acuícludos. La Fm. Candeleros posee tanto acuíferos libres como confinados y, las muestras que han sido tomadas para el análisis isotópico corresponden a acuíferos libres y semiconfinados.

Según los resultados obtenidos por Alonso *et al.* (2018), la Fm. Rayoso posee su máximo espesor (700 m) en el Dorso Los Chihuidos y el Grupo Neuquén se extiende en todo el subsuelo de la zona extraandina y en el centro este de la provincia alcanza más de 1000 m de espesor. Tanto la Fm. Rayoso como el Grupo Neuquén alojan múltiples acuíferos confinados de calidad variable. Estos se distribuyen heterogéneamente y se han reconocido patrones regionales que podrían ligarse a variaciones litológicas y de espesor presentes. La dirección regional de flujo subterráneo es predominantemente de oeste a este, con áreas de recarga y zonas de surgencia bien definidas en el Bajo de Añelo y al este del Vn. Auca Mahuida.

En cuanto a la recarga de este sistema acuífero, Gatica (2017) lo atribuye a las precipitaciones en el Dorso Los Chihuidos, el Volcán Auca Mahuida y a la zona de Sierra Negra. Meconi (2016) asegura que también hay recarga que corresponde al aporte de agua alóctona (por el deshielo de los Andes) por el río Neuquén.

Gatica (2017) considerando la evapotranspiración potencial de cultivo, litologías aflorantes, suelos y pendientes, estima que ambas formaciones (Rayoso y Candeleros) disponen de una recarga media anual similares, siendo de 86 mm/anales para el primero y de 71 mm/anales para el segundo, siendo una zona de aptitud moderada a baja para la recarga. Bajo estas condiciones y en función del área aflorante de estos depósitos en la provincia, este autor, estimó una recarga volumétrica anual de 740 hm³ para el Grupo Neuquén y de 260 hm³ para Fm. Rayoso. Si bien la recarga media es superior en el Fm. Rayoso, el



volumen de la recarga en el Grupo Neuquén es mayor debido a que su cobertura areal es mayor.

Es de interés destacar que la recarga, además de la pendiente, depende del material que tenga que atravesar. En el flanco este del dorso, Gatica (2017) ha obtenido los valores más bajos de infiltración potencial anual (<75 mm), donde dominan grandes cañadones con alta escorrentía superficial. En cuanto a la recarga potencial, sugiere que, si bien los valores no superan los 75 mm anuales, la gran superficie implicada permite la recarga potencial de importantes volúmenes. Además, estimó que 5500 hm^3 anuales se recargarían en promedio en la región extraandina árida. Por esta recarga, unos 750 hm^3 estarían disponibles por año para ser captados en los acuíferos de Fm. Rayoso y Grupo Neuquén.

Meconi (2016) estimó los niveles piezométricos midiendo algunos niveles piezométricos en pozos de explotación de agua en la región, y utilizando información indirecta de perfiles eléctricos en pozos hidrocarbúricos. Además, interpretó mediciones de presión en pozos surgentes y en ensayos de pozos petroleros con la herramienta “MDT” (“*Modular Formation Dynamics Tester*” de Schlumberger). De esta manera, obtuvo que el nivel piezométrico regional es subhorizontal y se encuentra entre 300 y 350 m. Los importantes desniveles topográficos hacen que este nivel esté a profundidades de cientos de metros o que sea surgente en distintos sectores. Este mismo autor señala que las reservas son nulas en el sector más alto del Dorso Los Chihuidos, que es cuando el nivel piezométrico queda por debajo de la parte clástica de la Fm. Rayoso y que en esa zona hay acuíferos colgados por encima de este nivel, que dan lugar a las vertientes utilizadas por los pobladores locales para su abastecimiento.

Aguas dulces se presentan en zonas elevadas asociadas a la recarga o en áreas vinculadas a valles aluviales. Aguas más mineralizadas están asociadas a disolución de sales desde las rocas sedimentarias y a un mayor tiempo de residencia en acuíferos confinados, influenciadas adicionalmente por la escasez de precipitaciones en la región (Bertoni y Dufilho, 2016).

La provisión de agua en el paraje Los Chihuidos se realiza a través de la captación de aguas subterráneas mediante perforaciones, para ser inyectada a la red. A fines del año 2018 se realizó una nueva perforación dado que el pozo más antiguo en funcionamiento, que producía agua del acuífero de la Fm. Candeleros, se quedó sin agua en el verano del año 2015 debido al aumento la demanda para consumo.

5 RESULTADOS

5.1 Modelo hidrogeológico conceptual

Considerando la información hidrológica y geológica disponible, se diseñó un modelo hidrogeológico conceptual del Dorso Los Chihuidos que contribuya con las interpretaciones hidroquímicas e isotópicas presentadas más tarde.

Los niveles potenciométricos (Fig.5.1) estimados a partir de mediciones en vertientes y pozos localizados en la Fm. Candeleros en abril 2019, muestra que la zona central del Dorso presenta los mayores niveles potenciométricos, actuando como zona de recarga, generando flujos divergentes hacia el río Neuquén y Bajo de Añelo. La existencia de acuíferos confinados surgentes en el Bajo de Añelo y la configuración litoestratigráfica y estructural del Gr. Neuquén-Fm Rayoso (buzamiento 3° a 5° al este - noreste de las capas del flanco oriental), confirman al Dorso como una de las fuentes de recarga.

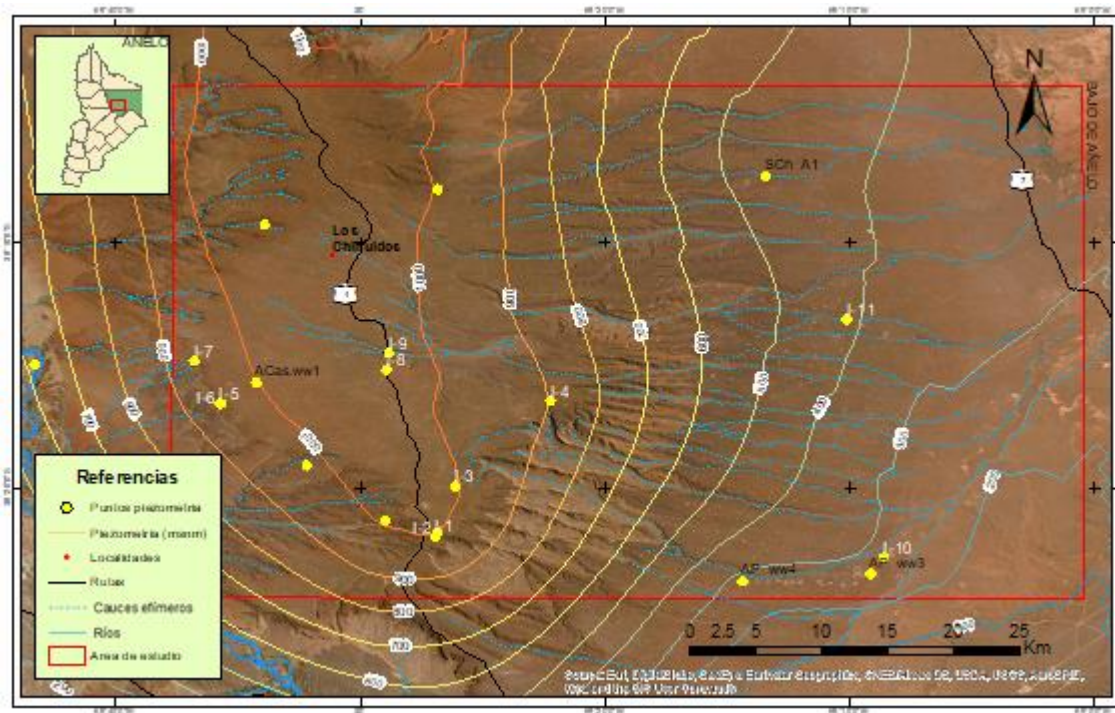


Figura 5.1. Niveles potenciométricos en la unidad acuífera Fm. Candeleros en el área de estudio.

Las vertientes existentes en la Fm. Candeleros en el área central del dorso más elevada, señalan que se trata de acuíferos colgados que se forman por presencia de estratos impermeables discontinuos, que permiten la acumulación parcial del agua infiltrada en el Dorso. El resto del agua infiltrada, percola en profundidad hasta alcanzar niveles de fangolitas o discontinuidades, permitiendo la recarga de los diferentes niveles acuíferos confinados regionales del sistema acuífero del Gr. Neuquén – Fm. Rayoso. El pozo ACas.ww1 ubicado en el sector SO del área de estudio, perforado en el año 2012 con el objetivo de caracterizar el acuífero y, eventualmente, producir agua para uso industrial, tuvo resultados negativos, no encontrándose niveles acuíferos. Esta situación podría confirmar el funcionamiento mencionado.

Nombre	Fecha	X	Y	Cota (msnm)	Profundidad (m)	Nivel estático (m)
ACas.ww1	01/11/12	2450055,35	5765224,17	1326,57	180	sin agua

Tabla 5.1. Pozo exploratorio para agua realizado por la empresa Total Austral S. A.

Esta dinámica puede observarse en el perfil potenciométrico oeste-este (Fig. 5.2) que permite reconocer las áreas de recarga en las partes altas del Dorso y la descarga de los acuíferos colgados alojados en la Fm. Candeleros mediante vertientes y, la transferencia de agua recargada hacia el Bajo de Añelo y hacia el río Neuquén.

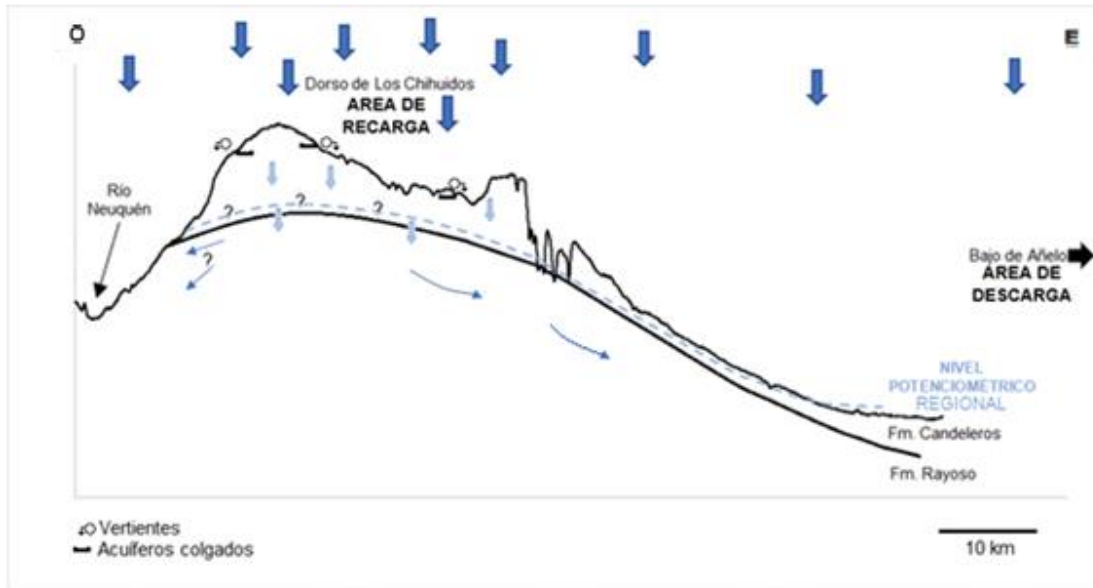


Figura 5.2. Modelo hidrogeológico conceptual.

Información hidrogeológica de las capas más profundas del sistema acuífero se presentan en la tabla 5.2. El pozo denominado AP.ww3 (12 en la Fig. 5.3), realizado por Total Austral S. A, es semisurgente, se encuentra en el área de Aguada Pichana (en el límite sur del área de estudio) y posee una profundidad total de 356,5 m. Atraviesa areniscas rojas con granos finos con intercalaciones de arcilitas con espesores variables, pertenecientes a Grupo Neuquén y tope de la Formación Rayoso, donde se evidencian 8 subacuíferos con espesores de 3 y 18 m entre los 88 y 354 mbbp. El pozo AP.ww4 (16 en la Fig. 5.3) con una profundidad total de 462 m atraviesa la misma litología que el anterior, pero, en este caso son 15 los subacuíferos detectados, con espesores de 6 y 12 m entre los 200 y 457 mbbp.

	AP.ww3	AP.ww4	Observaciones
Profundidad del pozo	365,5 m	462 m	
Nivel estático	51,33 mbbp	148 mbbp	Registro medido con sonda piezométrica
Cota del Nivel dinámico	344 msnm	368 msnm	
Resultados de los ensayos de bombeo	4 horas	7 días	Duración total de los Ensayos
	1,22 m ³ /h. m	0,79 m ³ /h. m	Caudal específico

Estimación de la productividad	63,1 m ² /día	15,8 m ² /día	Transmisividad
	0,82 m/día	0,13 m/día	Permeabilidad
	3960 m ³ /día	3024 m ³ /día	Caudal máximo calculado
	1207 m ³ /día (Enero, 2015)	1316 m ³ /día (Noviembre, 2014)	Caudal actual según bomba instalada

Tabla 5.2. Síntesis de las principales características de los pozos AP.ww3 y AP.ww4

Dada la localización y la profundidad de estos pozos, estarían reflejando principalmente el estado del acuífero confinado de Fm. Rayoso que tiene posible recarga local en la zona sur, en los afloramientos sobre el río Neuquén.

5.2 Caracterización hidrogeológica

5.2.1 Información disponible

Los análisis químicos otorgados por el Ente Provincial de Agua y Saneamiento de Neuquén (EPAS) e información disponible en el proyecto de investigación UNCOMA 04/1205 y 04/1243, incluyen muestras tomadas tanto en vertientes como en pozos dispersos en el área de estudio dentro del Dorso Los Chihuidos. Las muestras tomadas en pozos pertenecen, en su mayoría, a perforaciones realizadas en rocas del Grupo Neuquén y, en menor medida, en sedimentitas de la Fm. Rayoso (Bertoni y Dufilho, 2016) (Fig. 5.3) (tablas 5.3 y 5.4).

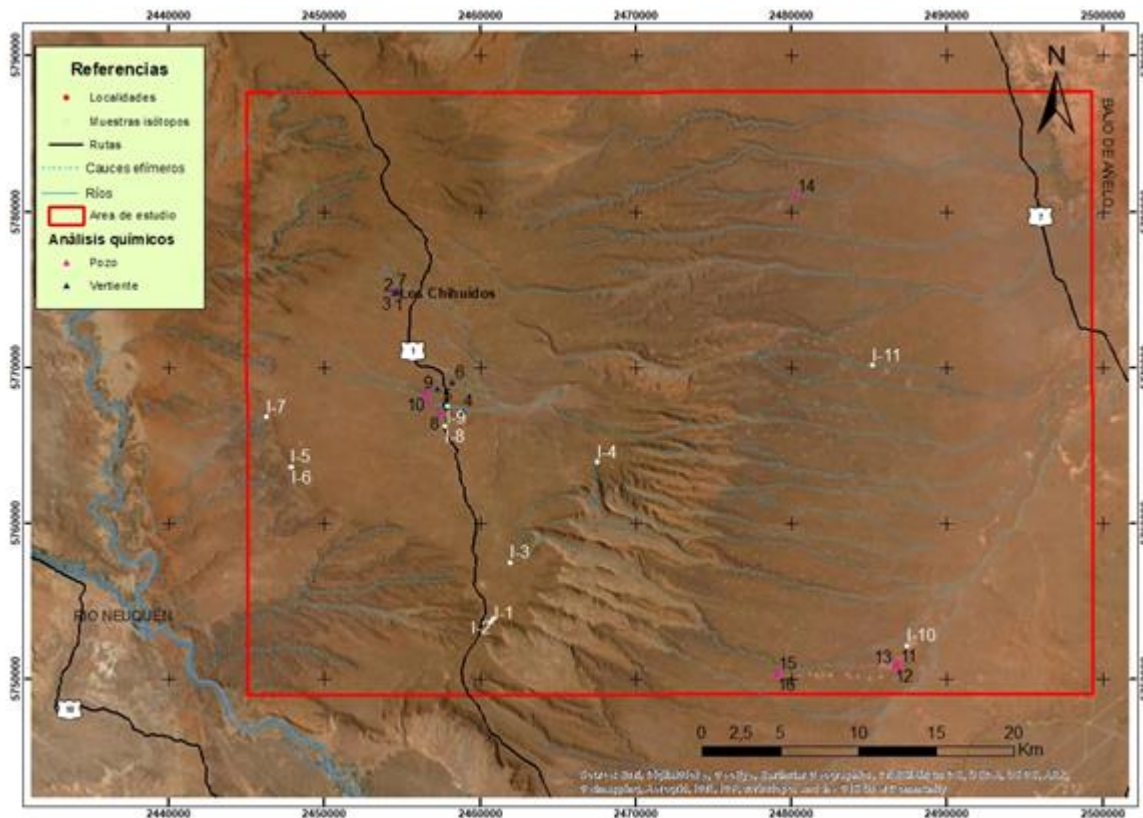


Figura 5.3. Sitios muestreados durante la salida de campo (i-número) y sitios con información de análisis químicos (números) recopilados en el Proyecto 04/1205 y 04/1243.



N°	Fecha	X	Y	Cota (msnm)	Tipo	Profundidad de muestra (mbbp)	Formación geológica	Fuente
1	03/10/08	2454623,32	5774742,02	1178	Vertiente	0	Candeleros	EPAS
2	SD	2454709,31	5774920,61	1179	Vertiente	0	Candeleros	SD
3	SD	2454464,57	5774755,24	1186	Vertiente	0	Candeleros	SD
4	03/10/08	2458919,31	5767154,16	1005	Vertiente	0	Candeleros	EPAS
5	03/10/08	2457252,43	5768609,37	1063	Vertiente	0	Candeleros	EPAS
6	03/10/08	2458178,47	5769032,71	1017	Vertiente	0	Candeleros	EPAS
7	22/05/14	2454709,31	5774920,61	1179	Perforación	80	Candeleros	EPAS
8	25/09/98	2457490,56	5767021,87	1053	Perforación	SD	SD	EPAS
9	26/09/08	2456511,60	5768344,79	1066	Perforación	SD	SD	EPAS
10	3/10/08	2456723,26	5767736,25	1055	Perforación	SD	SD	EPAS
11	27/09/12	2486808,67	5750883,59	395	Perforación	Entre 88 y 354	Candeleros y Rayoso	Total Austral S. A
12	10/02/12	2486697,54	5750883,59	396	Perforación	Entre 88 y 354	Candeleros y Rayoso	Total Austral S. A
13	10/02/12	2486735,65	5750986,08	395	Perforación	Entre 88 y 354	Candeleros y Rayoso	Total Austral S. A
14	10/12/94	2480406,01	5780955,16	521	Perforación	SD	SD	Petrobras
15	26/09/14	2479201,65	5750345,87	519	Perforación	Entre 200 y 457	Candeleros y Rayoso	Total Austral S. A
16	27/09/14	2479084	5750338,78	516	Perforación	Entre 200 y 457	Candeleros y Rayoso	Total Austral S. A

Tabla 5.3. Perforaciones y vertientes utilizadas indicando coordenadas, cota del terreno, formación geológica, fecha y fuente. SD: sin datos (Fuente Proyecto 04/I/205).

N°	T°C	pH	CE 25°C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Tipo geoquímico (Custodio, 1983)
1			649*	12,8	4,1	147	0	46	143	118	Sulfatada-bicarbonatada sódica
2			1549*	74	27,4	264	0	84	394	268	Sulfatada sódica
3			1993*	109	35	321	0	168	514	248	Sulfatada sódica
4		8,1	439*	12,8	4,1	120,29	1,2	46	143	118	Sulfatada-bicarbonatada sódica
5		7,6	1323	74	27,4	107,18	0	84	394	268	Sulfatada sódica-cálcica
6		7,8	1774	109	35	321	3,2	168	514	248	Sulfatada sódica
7			1499*	67	38	228	0	175	402	139	Sulfatada sódica
8		8	1570	75	21	277,10	0	189	463	158	Sulfatada sódica
9		7,8	1023	68	11	157,11	0	82	257	212	Sulfatada-bicarbonatada sódica
10		7,6	5304	161	105	1071	0	713	1798	350	Sulfatada sódica
11	23,2	9,04	794	2	0,49	482,85	0	280	90	643,36	Bicarbonatada sódica
12		9,02	3071	26,7	0,6	641,8	0	385	627	292	Sulfatada-clorurada sódica
13		8,6	3223*	17,5	0,5	760	0	349	449	698	Bicarbonatada-clorurada sódica
14			2560*	3,6	2,2	600	0	570	110	512	Clorurada sódica
15	20,4	9,06	2250	5,61	0,72	386,81	0	226	195	309,88	Clorurada-bicarbonatada sódica

16	20,5	9,13	2230	5,61	0,72	462,14	0	206	410	290,36	Sulfatada-clorurada sódica
----	------	------	------	------	------	--------	---	-----	-----	--------	-------------------------------

Tabla 5.4. Composición química del agua. Cationes y aniones en mg/l. (Fuente Proyecto 04/I205).
CE en $\mu\text{S/cm}$, * estimadas a partir de la salinidad analítica.

5.2.2 Resultados hidrogeoquímicos obtenidos en el campo

Las muestras fueron tomadas en vertientes, pozos, perforaciones y cauces del área de estudio en los sitios indicados en la Fig. 5.3 y tabla 5.5, donde es la única fuente de abastecimiento de los puesteros, quienes desconocen la calidad del agua que consumen.

N°	Fecha de toma de muestra	X	Y	Cota (msnm)	Tipo	Formación geológica
I-1	06/04/19	2460783.047	5753686.911	1153	Vertiente	Candeleros
I-2	06/04/19	2460887.668	5753939.651	1162	Vertiente	Candeleros
I-3	06/04/19	2461960.596	5757472.315	1135	Vertiente	Candeleros
I-4	06/04/19	2467591.381	5763928.660	1052	Vertiente	Candeleros
I-5	06/04/19	2447875.382	5763631.436	1046	Vertiente	Candeleros
I-6	06/04/19	2447961.118	5763642.164	1057	Vertiente	Candeleros
I-7	06/04/19	2446341.272	5766833.236	1064	Vertiente	Candeleros
I-8	06/04/19	2457806.969	5766251.683	1053	Pozo	Candeleros
I-9	06/04/19	2457933.942	5767506.392	1008	Perforación	Candeleros
I-10	07/04/19	2487469.322	5752148.761	379	Perforación	Candeleros
I-11	07/04/19	2485247.756	5770143.157	440	Cauce	Candeleros

Tabla 5.5. Vertientes, pozos, perforaciones y cauces muestreados con coordenadas, cota topográfica, formación geológica y fecha.

Las muestras I-1 a I-7 fueron tomadas de vertientes que tienen lugar en las areniscas y conglomerados de la formación más antigua del Grupo Neuquén, Fm. Candeleros. La muestra I-8 fue tomada de una perforación a la vera de la Ruta Provincial N°1, llegando a la localidad de Los Chihuidos; la I-9 de un pozo en la escuela N°264; la muestra I-10 fue tomada de una perforación al este de las cárceles y, por último, la muestra I-11 fue tomada en una surgencia del lecho de un cauce efímero. Todas corresponden a Fm. Candeleros.

En la Tabla 5.6 se presentan los datos obtenidos in situ.

Muestra	Profundidad (m)	CE ($\mu\text{S/cm}$)	pH	T° (°C)	Caudal (L/min)
I-1	0	560	7,12	15	-
I-2	0	570	7,45	13,1	-
I-3	0	419	7,14	17,6	1,5-2
I-4	0	810	6,87	18,5	3
I-5	0	770	7,27	19,3	0,5
I-6	0	740	7,35	15,9	4,3
I-7	0	748	6,85	19,3	15
I-8	80	1410	7,40	17,1	-
I-9	2	>2000	7,17	16,2	-
I-10	100	358	7,86	21,5	100
I-11	0	1216	7,40	17,8	-

Tabla 5.6. Resultados del censo hidrogeológico realizado.

5.2.3 Tipificación y evolución del agua subterránea

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en campo y los datos antecedentes otorgados por el Ente Provincial de Agua y Saneamiento de Neuquén (EPAS) e información disponible en el proyecto de investigación 04/1205 y 04/1243, se calcularon mínimos, máximos y promedios de las muestras, separando los datos de vertientes de los de perforaciones y pozos (Tabla 5.7). El objetivo de estos cálculos fue tener un sustento estadístico para realizar y establecer diferenciaciones geoquímicas.

			MIN.	MAX.	PROM.
Antecedentes (anteriores al año 2014)	Vertientes	CE ($\mu\text{S/cm}$)	439	1993	1288
		T° ($^{\circ}\text{C}$)	SD	SD	SD
		pH	7,6	8,1	7,8
	Perforaciones y pozos	CE ($\mu\text{S/cm}$)	794	5304	2352
		T° ($^{\circ}\text{C}$)	20,4	23,2	21,3
		pH	7,6	9,1	8
Relevamiento (año 2019)	Vertientes	CE ($\mu\text{S/cm}$)	419	810	660
		T° ($^{\circ}\text{C}$)	13,1	19,3	16,9
		pH	6,85	7,45	7,15
	Perforaciones y pozos	CE ($\mu\text{S/cm}$)	358	>2000	1256
		T° ($^{\circ}\text{C}$)	16,2	21,5	18,2
		pH	7,17	7,86	7,47
Todos los datos		CE ($\mu\text{S/cm}$)	358	5304	1636
		T° ($^{\circ}\text{C}$)	13,1	23,2	18,2
		pH	6,85	9,13	7,8

Tabla 5.7. Estadísticos de los parámetros hidrogeoquímicos de las muestras.

Dentro de los datos antecedentes disponibles, hay una diferencia de CE de aproximadamente $1000 \mu\text{S/cm}$ entre la de vertientes y la de perforaciones y pozos, siendo menor en vertientes ($1288 \mu\text{S/cm}$). En cuanto a los valores de pH, no hay variaciones notorias (7,8 en vertientes y 8 en pozos y perforaciones). En relación a los datos relevados en el proyecto (año 2019), la CE entre ambos también es mayor en pozos y perforaciones (aproximadamente superior en $800 \mu\text{S/cm}$). Los valores de temperaturas no presentan



variaciones destacables entre sí, siendo que rondan los 17°C y son neutras a levemente alcalinas.

Las muestras de aguas subterráneas en conjunto, presentan un pH promedio de 7,8, con un mínimo de 6,85 y un máximo de 9,13, indicando un carácter neutro a levemente alcalino. La temperatura promedio es de 18,2°C y oscilan desde los 13,1 a los 23,2°C. Con respecto a la conductividad eléctrica, el promedio es 1636, alcanzando valores mínimos y máximos de 358 a 5304 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

5.2.3.1 Diagrama de Piper-Hill-Langelier

Los análisis químicos permitieron determinar a través del diagrama de Piper-Hill-Langelier que, tanto las muestras tomadas en acuíferos confinados del Grupo Neuquén y Fm. Rayoso, como las tomadas en afloramientos de aguas subterráneas que estaba contenida en la Fm. Candeleros, corresponden a aguas del tipo clorurada sódica y cálcica y sulfatada sódica (Fig. 5.4). Se diferencian dos grandes grupos en cuanto al contenido de sodio, calcio y magnesio. Por un lado, las muestras de perforaciones N°11 a la 16, junto con la de vertientes N°1 y 4, poseen un mayor contenido de sodio y, por otro lado, las muestras restantes presentan una composición más cálcica, aunque aún siguen denotando un carácter geoquímico sódico.

El elevado contenido de sodio es probable que se deba al tiempo prolongado de circulación de las aguas a través de los estratos multicapas del Grupo Neuquén, donde las aguas captan este ion de las arcillas, el cual tenderá a permanecer disuelto en el agua en circulación. Aunque, es notorio que las aguas que involucran a Fm. Rayoso son más sódicas que aquellas que sólo están en contacto con Fm. Candeleros.

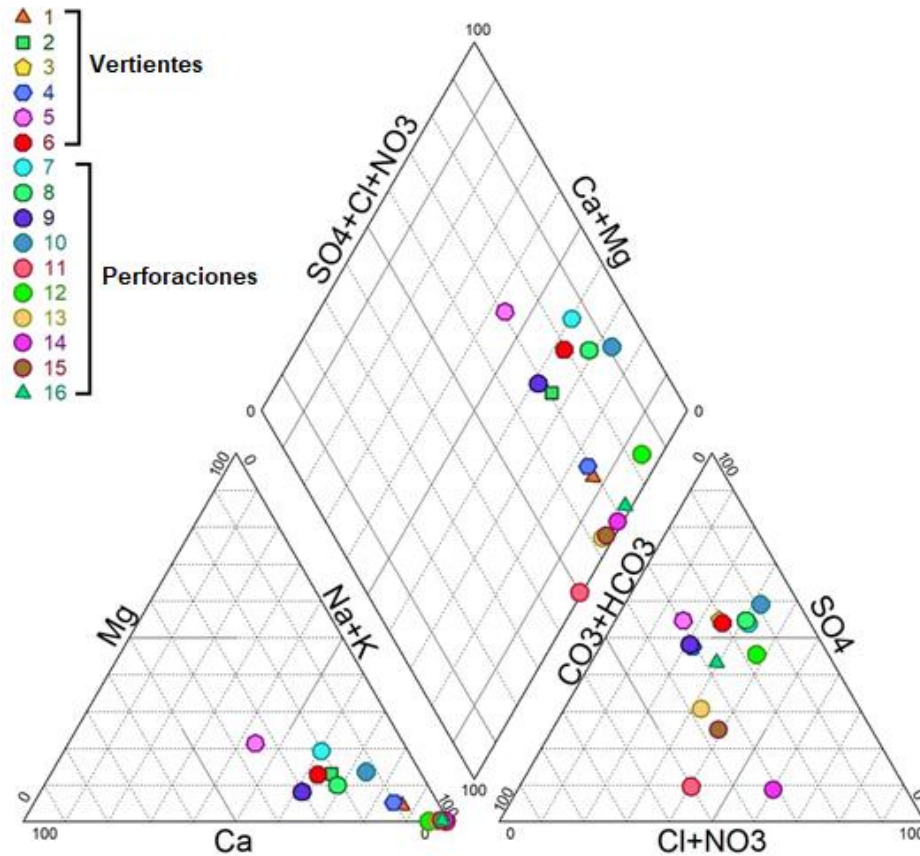


Figura 5.4. Diagrama de Piper con muestras de seis vertientes y once perforaciones ubicados dentro del área de estudio con Diagrammes v6.5.

5.2.3.2 Clasificación Custodio (1983)

En la tabla 5.2 se muestra la clasificación de aguas por tipo geoquímico según Custodio (1983), donde queda en exposición el 43,75% de las muestras corresponde a aguas sulfatadas (37,5% sódicas y 6,25% sódica-cálcicas) y un 31,25% son sulfatadas mixtas. Un 12,5% son cloruradas y 6,25% cloruradas mixtas, mientras que el resto son aguas bicarbonatadas mixtas.

5.2.3.3 Diagrama de Stiff

Con el fin de facilitar la comprensión de la evolución del agua en el área de estudio, se graficaron las concentraciones de cationes y aniones de las 16 muestras mediante el diagrama de Stiff. A continuación, los diagramas resultantes fueron ubicados en el sitio de muestreo en el mapa de la zona (Fig.5.5).

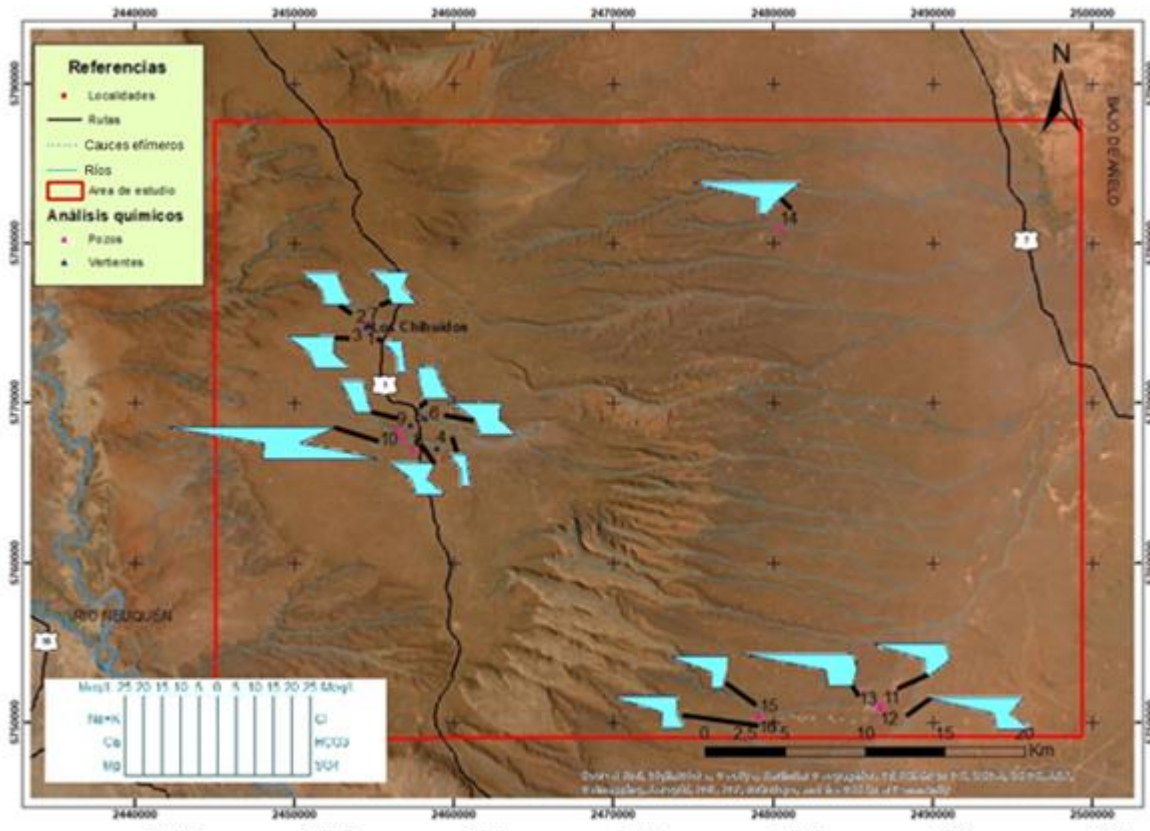


Figura 5.5. Distribución geográfica del diagrama de Stiff de cada muestra de agua en el área de estudio.

En términos espaciales, el grado de evolución del agua incrementa en el sentido del flujo subterráneo. Las aguas menos evolucionadas se localizan en las cercanías de la Ruta Provincial N°1 y, las más evolucionadas se ubican hacia el este. Este comportamiento tiene a la muestra N°10 como excepción, la cual presenta una CE de 5304 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esta elevada salinidad respecto al resto de las muestras, que poseen similares CE y carácter geoquímico, se debe a que existe evaporación. Esta muestra fue tomada de un acuífero libre en un mallín en la escuela N°264 en el año 2008 y, la muestra N°8 fue tomada en el mismo sitio, pero en 1998 y la salinidad obtenida fue menor. Esto evidencia que el mallín ha ido concentrando sales en el agua y perfil del suelo con el tiempo, como resultado de la evapotranspiración, ya que el agua está a menos de 2 m de profundidad. Se trata de un humedal con déficit hídrico.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico se pueden reconocer 4 grupos principales representativos de aguas, que quedan representados por los diagramas de Stiff de la figura 5.6.

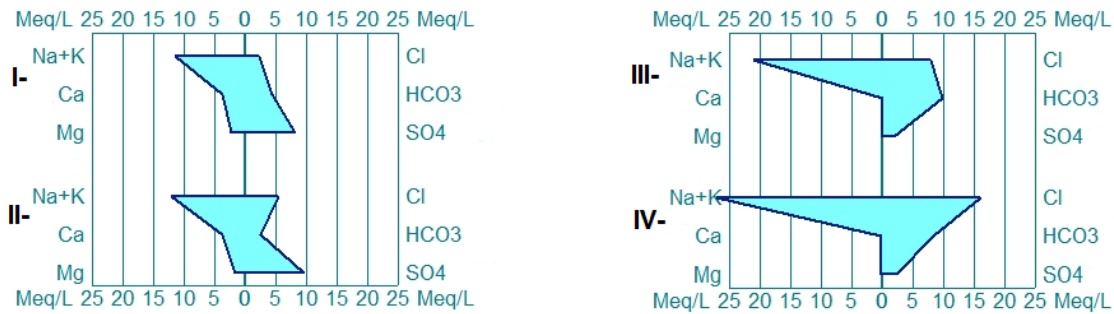


Figura 5.6. Tipos representativos de aguas subterráneas presentes en el área de estudio.

En esta clasificación se contempla que, el grupo I representa a las muestras de aguas subterráneas tomadas de vertientes de Fm. Candeleros en la parte alta del Dorso Los Chihuidos, a una cota mayor a 1000 msnm. Son aguas con una CE promedio de 1288 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que son de tipo sulfatadas sódicas y sulfatadas mixtas (bicarbonatadas sódicas y sódico-cálcicas). Este grupo representa a las muestras N° 1 a la 6 y, se infiere que también a las muestras I-1 a I-7 inclusive.

El grupo II incluye a las muestras N° 7, 8, 9 y 10, junto con las I-8 e I-9 que se asocian por inferencia. Corresponden a aguas de tipo sulfatadas sódicas tomadas de perforaciones ubicadas en la parte alta del dorso (a cota topográfica mayor a 1000 msnm), que captan agua de la Fm. Candeleros.

El grupo III representa muestras de agua tomadas a 88 a 354 mbbp de perforaciones que se ubican al este de las cárceles (ver figura 4.9 B), en el área de concesión hidrocarburífera Aguada Pichana, en una cota topográfica de 395 msnm. Son aguas de tipo bicarbonatadas mixtas (sódicas y sódico- cálcicas), con una CE en el orden de los 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que son captadas de las formaciones Candeleros y Rayoso. Implica a las muestras N°11, 12 y 13, además, se infiere que también representa a la muestra I-10.

Por último, el grupo IV contempla las muestras N° 14, 15 y 16, también tomadas de perforaciones realizadas al este de las cárceles, pero, en este caso, la profundidad es entre 200 y 457 mbbp (la cota topográfica es de 519 msnm). Se trata de aguas clasificadas como cloruradas mixtas (sódicas y bicarbonatadas sódicas) con una CE en el orden de los 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que son captadas de las formaciones Candeleros y Rayoso.

En términos espaciales, el grado de evolución del agua incrementa en el sentido del flujo subterráneo (Fig. 5.5). Las aguas menos evolucionadas se localizan en las cercanías de la Ruta Provincial N°1 y, las más evolucionadas se ubican hacia el este, en dirección al Bajo de Añelo.

5.3 Caracterización isotópica

5.3.1 Información disponible

Son de utilidad los datos obtenidos por Tchilinguirian (2014), quién ha realizado análisis de isótopos para la caracterización hidrogeológica de un yacimiento ubicado aproximadamente 70 km al norte del área de estudio, conocido como El Trapial (Fig 5.7).

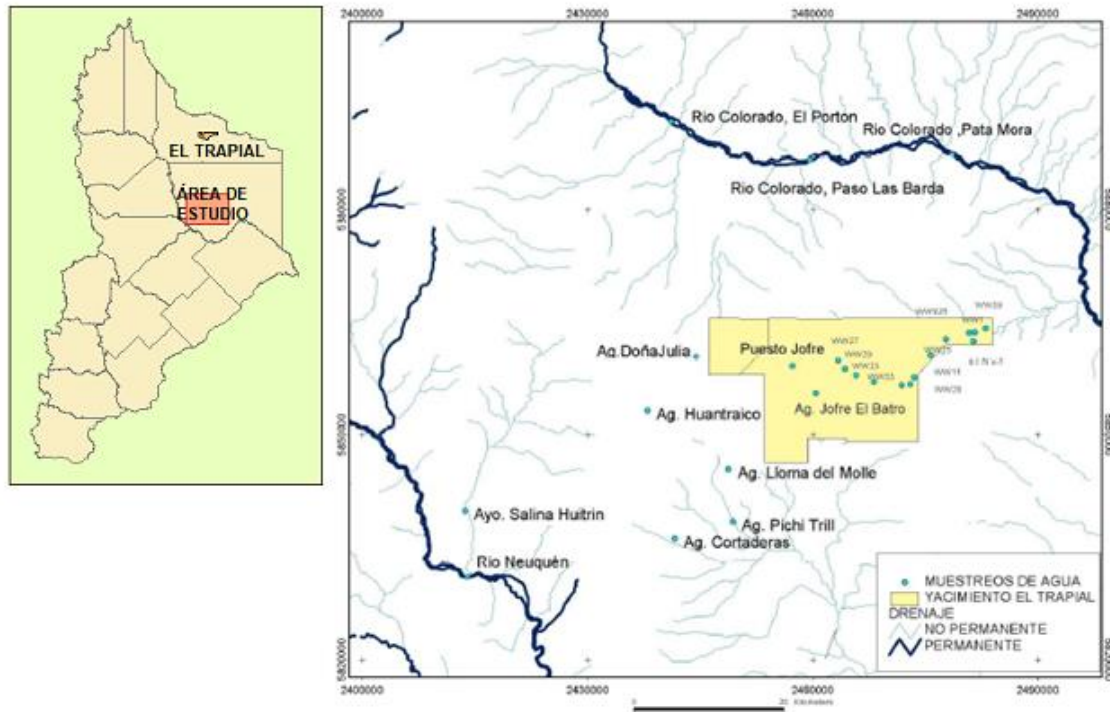


Figura 5.7. Muestras de agua del año 2007 y 2013 en Yacimiento El Trapial y cercanías (Tchilinguirian, 2014).

Las muestras fueron realizadas en 2007 y 2013 en ríos, vertientes y pozos. Los resultados que resultan de utilidad, se presentan en la tabla 5.8 y, serán utilizados más adelante para realizar comparaciones respecto a los resultados obtenidos en este trabajo por la cercanía de ambas áreas. El autor afirma que el Dorso Los Chihuidos es una zona potencial para la recarga, lugar donde los afloramientos de Fm. Candeleros buzcan hacia el este y hacia el yacimiento El Trapial, es decir, hacia el norte. Los numerosos cursos de agua intermitentes que surgen de vertientes situadas en el contacto Rayoso (clástico) - Fm. Candeleros (algunas de ellas muestreadas para la realización del presente trabajo), son evidencia de la recarga efectiva aún bajo las condiciones actuales semiáridas. Este autor sugiere también la posibilidad de recarga por precipitaciones en el Dorso durante épocas glaciarias en el Cuaternario. La altura de la recarga estaría entre los 900 a 1200 msnm, cota que es superior a la que se encuentra el nivel de agua en el Yacimiento El Trapial (500 a 300 msnm). En base a análisis hidroquímicos, este autor afirma que las aguas del Grupo Neuquén son bien distintas a las aguas de formación. Clasifica las aguas mediante diagramas de Piper como cloruradas sódicas en su mayoría, y una minoría como cloruradas-bicarbonatadas- sódicas y bicarbonatadas- cloruradas- sulfatadas- sódicas. En este estudio se comprobó que las aguas tienen más de 100 años de antigüedad debido a la ausencia de tritio. También que los valores encontrados en todas las muestras reflejaron

precipitaciones ligadas a los frentes polares o provenientes del Pacífico sur, ya que las precipitaciones ecuatoriales o provenientes del Atlántico tienen valores más elevados de $\delta^{18}\text{O}$. A partir de esta simplificación, se supuso que las aguas del grupo Neuquén provienen de precipitaciones originadas en el Pacífico.

Lugar	Nombre	Año	Tipo de agua	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ (VSMOW)	$\delta^2\text{H}$ ‰ (VSMOW)
Río Neuquén en Balsa Huitrín	A	2013	Río	166	-12,6	-92,5
Río Colorado en Filo Morado	B	2007	Río	1111	-11,5	-88,0

Tabla 5.8. Valores isotópicos de las muestras de las aguas de ríos en Yacimiento El Trapial y cercanías (Tchilinguirian, 2014).

5.3.2 Resultados isotópicos

En las once muestras de agua analizadas corresponden a: siete de vertientes, una de pozo (de escasa profundidad y anchura significativa), dos de perforaciones (de mayor profundidad, escaso diámetro y con bombas para extraer agua profunda) y una de un cauce efímero (Fig. 5.3 y Tabla 5.5). Los datos obtenidos se muestran en las tablas 5.9.

N°	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ (VSMOW) ± 0.3	$\delta^2\text{H}$ ‰ (VSMOW) ± 1	Exceso de deuterio “d”
I-1	-10,6	-79	5,8
I-2	-10,5	-78	6
I-3	-10,9	-79	8,2
I-4	-9,8	-75	3,4
I-5	-11,4	-92	-0,8
I-6	-11,3	-92	-1,6
I-7	-11,6	-92	0,8
I-8	-11,2	-91	-1,4
I-9	-10,9	-91	-3,8
I-10	-9,1	-69	3,8
I-11	-10,4	-71	12,2

Tabla 5.9. Resultados del análisis isotópico realizado por el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS). Fecha de evaluación 10/07/19.

Las variaciones que muestran los excesos de deuterio sugieren la existencia de distintas masas de humedad, que generan lluvias en la zona y dan origen al agua muestreada (Fig. 5.8). En general, los excesos de deuterio obtenidos muestran valores menores a 10‰, lo que es típico de precipitaciones nievadas, siendo las muestras de vertientes I-5, I-6 e I-7, la del pozo I-8 y de la perforación I-9, las que poseen valores más bajos de “d”, inferiores a 1. Esto denota una posible ocurrencia de mayores eventos nivados en la zona, lo cual se condice con la altitud en la que se encuentran los sitios censados.

Pero también estos valores negativos del exceso de deuterio podrían indicar que las precipitaciones que recargan estos acuíferos podrían proceder del Océano Pacífico, en coincidencia con lo señalado por Tchilinguirian (2014). Esto es factible debido a que los sitios están localizados en la parte alta y en el flanco oeste del Dorso.

Los valores superiores a 1 que ocurren en los sitios ubicados en el flanco este del dorso, indicarían que reciben precipitaciones procedentes del Océano Atlántico.

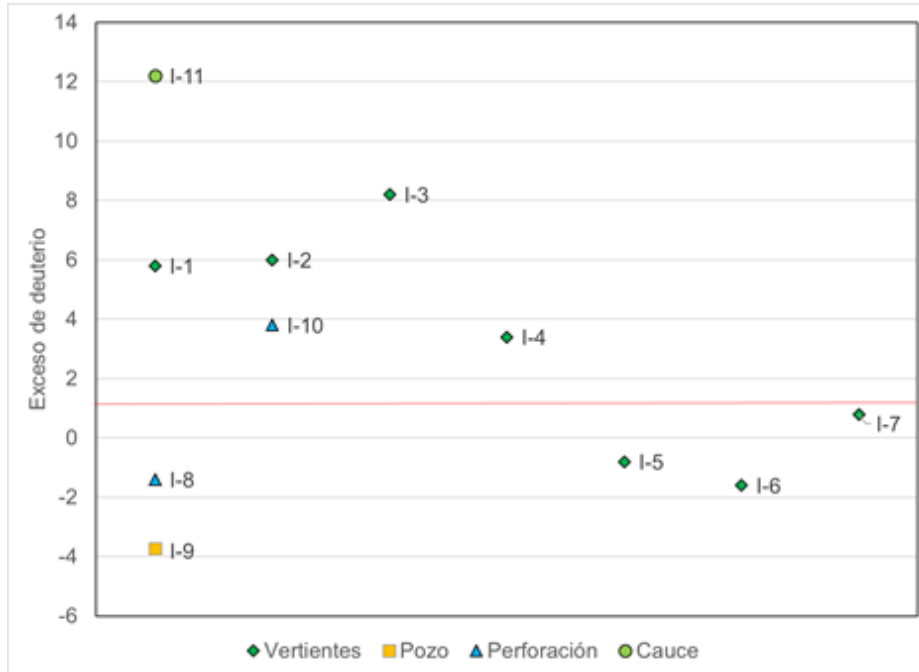


Figura 5.8. Excesos de deuterio de las muestras de aguas analizadas.

5.3.3 Relación deuterio- oxígeno 18

En base a la información disponible y a la obtenida a partir del muestreo, se realizaron los diagramas $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ (Fig. 5.9) y $\delta^{18}\text{O}$ vs. Conductividad eléctrica (Fig. 5.10).

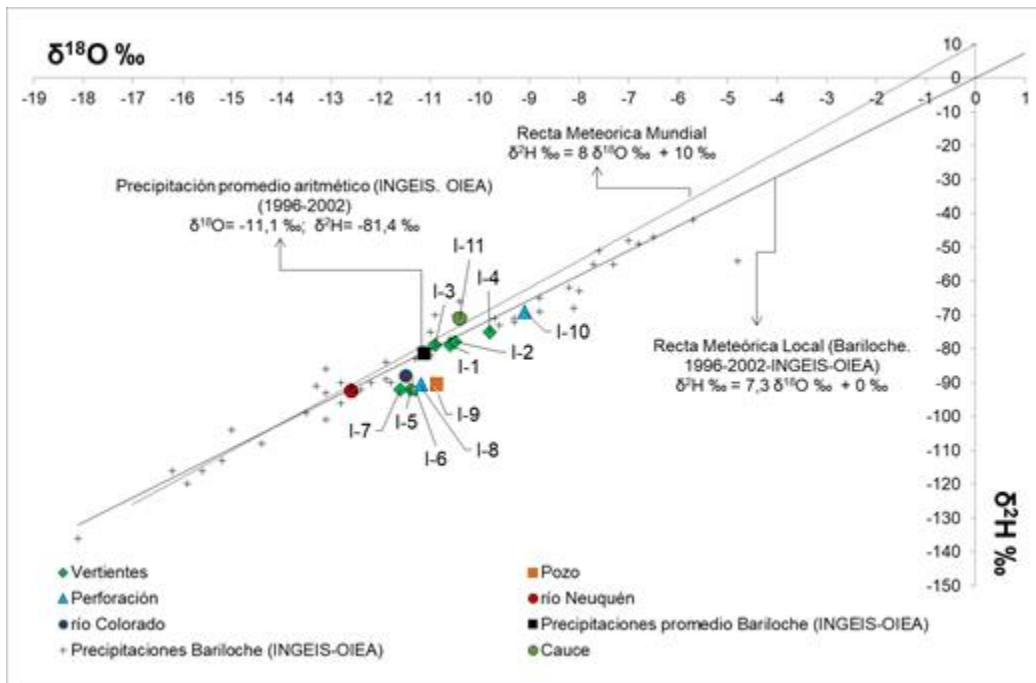


Figura 5.9. Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ para aguas subterráneas del área de estudio, Yacimiento El Trapial y precipitaciones de Bariloche.

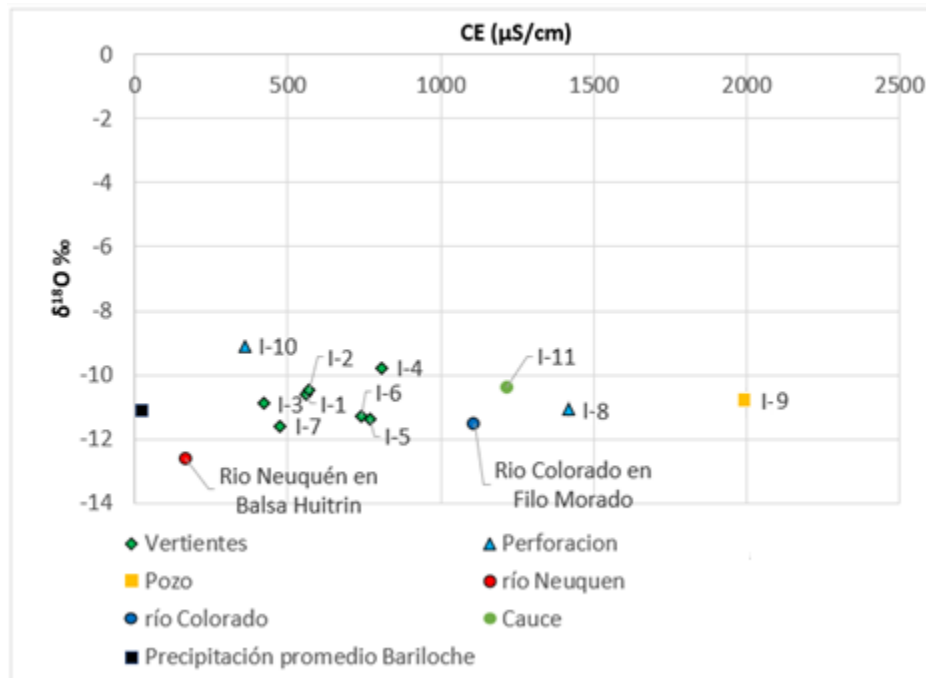


Figura 5.10. Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs. CE para las muestras analizadas.

La línea meteórica local de Bariloche obtenida por regresión ortogonal (Dapeña y Panarello, 2008a) posee una pendiente similar a la de la recta meteórica mundial, con valores de 7,3 y 8 respectivamente y, difiere en los valores de exceso de deuterio, mostrando valores de ordenada al origen de 0 y 10 respectivamente. Los autores afirman que la relación entre la composición isotópica y la temperatura en la estación Bariloche muestra contenidos empobrecidos en los meses con menor temperatura y más enriquecidos en los más cálidos de acuerdo a lo esperado. El exceso de deuterio característico de las regiones con precipitaciones nivales, en general es menor que 10‰, siendo similar al obtenido con las muestras analizadas para este trabajo final de licenciatura.

La composición de los isótopos estables, ^2H y ^{18}O , del Dorso Los Chihuidos muestra dispersión media en los datos correspondientes al agua subterránea, con valores entre -69 y -92 de $\delta^2\text{H}\text{‰}_{\text{VSMOW}}$ y -9,1 y -11,6 de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}_{\text{VSMOW}}$.

La Fig. 5.9 indica que la recarga se produce por precipitaciones locales en toda la extensión del Dorso Los Chihuidos. La diferencia en la huella isotópica de las muestras permite distinguir dos orígenes diferentes a distinta altitud.

Se infiere que las vertientes de las que fueron tomadas las muestras I-5, I-6 e I-7 corresponden a acuíferos colgados y que, la procedencia de las precipitaciones del Pacífico junto con la ocurrencia de una mayor cantidad de eventos nivales en el flanco oeste del Dorso explica la recarga de aguas más empobrecidas isotópicamente en esta zona. Por otro lado, las vertientes I-1, I-2, I-3 e I-4, que tienen menor conductividad eléctrica que las antes mencionadas, también corresponden a acuíferos colgados, pero estos están situados probablemente próximas a la divisoria de aguas subterráneas (eje del anticlinorio). I-10 se encuentra aguas abajo de las vertientes I-1 e I-4, si bien es la muestra más enriquecida isotópicamente, está sobre la recta meteórica, conservando la huella isotópica. Teniendo en cuenta la diferencia de cota entre la parte alta del Dorso y la cota de la muestra, el



enriquecimiento podría estar dado por la influencia de precipitaciones ocurridas a menor altitud, además de la infiltración de las precipitaciones locales.

A partir de las figuras 5.8, 5.9 y 5.10 se afirma que en el Dorso Los Chihuidos existen aguas recargadas a distintas altitudes. Las precipitaciones de Bariloche se dan a altitudes aproximadas de 700 msnm por eso es que su composición isotópica se acerca más a de las muestras que están a menores altitudes en el área de estudio comprendida, mientras que aquellas ubicadas en el Dorso a una cota topográfica mayor a 1000 msnm están más empobrecidas. Dado que el Río Neuquén tiene recarga alóctona, a mayores altitudes, en el Dorso las precipitaciones serían de composición isotópica intermedia entre las de Bariloche y la del área de recarga del Río Neuquén.

Finalmente es posible confirmar que los acuíferos presentes en la Fm. Candeleros en el área de estudio son recargados por precipitaciones locales, originadas a distintas altitudes.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los estudios realizados permitieron conocer tanto las características hidrogeoquímicas como isotópicas del Sistema Acuífero Grupo Neuquén y Formación Rayoso.

Si bien la zona se caracteriza por un marcado déficit hídrico debido a que las precipitaciones son inferiores a 200 mm anuales y ocurren en cortos períodos de tiempo, se generan excedentes hídricos que logran alcanzar el acuífero, especialmente en otoño e invierno cuando se observan las mayores concentraciones de las precipitaciones junto con las menores tasas de evapotranspiración.

El Dorso Los Chihuidos es una estructura anticlinoria de gran radio de curvatura, N-S, buzante también al N y al S, cuya morfología actual se debe a los últimos movimientos del Ciclo Ándico en el Neógeno y sus pulsos más jóvenes e intensos en el Mioceno. La estratigrafía comprende desde sedimentitas de rift asignados al Grupo Precuyo hasta depósitos recientes, siendo las unidades de interés hidrogeológico la Fm Rayoso constituida por sedimentos continentales lacustres, clásticos-evaporíticos, del Cretácico Temprano, y el Grupo Neuquén (Fm Candeleros) conformado por depósitos continentales fluviales, eólicos y lacustres del Cretácico Superior (Cenomaniano).

Geomorfológicamente se trata de un *plateau* elevado (cotas máximas de 1400 msnm) con ondulaciones, fallas longitudinales, domos y estructuras menores, en donde se destacan "los chihuidos" que coronan la superficie y "las cárceles" (depresiones de paredes verticales) en los flancos del Dorso.

Tanto Fm Rayoso como el Grupo Neuquén alojan múltiples acuíferos confinados de calidad variable, siendo la dirección regional de flujo subterráneo predominantemente de oeste a este. Las áreas de recarga de estos sistemas acuíferos en la Cuenca Neuquina son el Dorso Los Chihuidos, el Volcán Auca Mahuida y la zona de Sierra Negra. Algunos autores sugieren también al aporte de agua alóctona (por el deshielo de los Andes) por el Río Neuquén. Las tasas de recarga se han estimado en el orden de hasta 75 mm anuales.

El nivel piezométrico más elevado en el centro del Dorso permite la existencia de acuíferos colgados, la recarga a niveles más profundos y que exista surgencia en los sectores más bajos como el Bajo de Añelo.

La descarga de este sistema hidrogeológico se da justamente en el Bajo de Añelo (ubicada hacia el este fuera del área estudiada) y en vertientes en diversos sitios del Dorso.

En términos espaciales, 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 1000 msnm, son aguas dulces (CE promedio de 1288 $\mu\text{S}/\text{cm}$) 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 tiene agua con mayor contenido salino (CE en el orden de los 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y de tipo bicarbonatadas mixtas, cloruradas mixtas y sulfatadas mixtas, siempre sódicas.

Por otro lado, las variaciones observadas en los excesos de deuterio sugieren la existencia de distintas masas de humedad, que generan lluvias en la zona y dan origen al agua muestreada, pudiendo asociarse los valores negativos de "d" a precipitaciones más frías, procedentes del Océano Pacífico.



Además, a partir de la interpretación de resultados isotópicos, se confirmó que los acuíferos presentes en la Fm. Candeleros en el área de estudio son recargados por precipitaciones locales, originadas a distintas altitudes. Al no contar con información isotópica correspondiente a las aguas presentes en Fm. Rayoso, no fue posible determinar el origen de la recarga, aunque la hipótesis de la misma es que Fm. Rayoso, a diferencia de Fm. Candeleros posee flujos más profundos con recarga más alóctona. De esta manera, la composición de esta agua estaría dado por una mezcla de precipitaciones locales y agua superficial infiltrada del río Neuquén.

Queda confirmado que la recarga del sistema acuífero en cuestión, en el Dorso Los Chihuidos, se produce dentro del área estudiada.

Las interpretaciones a partir de datos isotópicos pueden resultar riesgosas si no se realizan sobre la base de un buen modelo geohidrológico conceptual del área.

Las interpretaciones quedan abiertas a la disponibilidad de nuevos datos, junto con información de subsuelo más detallada de la compleja estructura anticlinoria del Dorso Los Chihuidos. Resulta necesario continuar la línea de estudio con el análisis de aguas más profundas, que sean captadas de la Fm. Rayoso para confirmar o refutar la hipótesis planteada acerca del origen de su recarga. Además, no se cuenta con información suficiente de profundidades de las captaciones, lo que podría dar origen a una nueva interpretación.

Por otro lado, surge la necesidad de coleccionar datos de precipitaciones con el fin de construir una recta meteórica local del Dorso Los Chihuidos, ya que al utilizar la correspondiente a Bariloche, las interpretaciones realizadas no son precisas.



7 BIBLIOGRAFÍA

- 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. 9º Congreso Argentino de Hidrogeología y 7º Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Relación Agua Subterránea – Agua Superficial: 46-53. Catamarca.
- ALONSO, M.; DUFILHO, A. C. y GIUSANO, A. 2018. Límites litoestratigráficos de las unidades acuíferas Formación Rayoso y Grupo Neuquén en la Cuenca Neuquina. El Agua Subterránea: “Recurso sin Fronteras”. Hidrogeología Regional Volumen I: 199-206. Salta.
- APARICIO MIJARES, F. J. 1992. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores. México.
- ÁRCEGA SANTILLÁN, M. 2010. Caracterización Hidrogeoquímica del Acuífero del Valle de Villa Hidalgo, San Luis Potosí, México. Tesis de maestría. 67pp.
- ARREGUI, C., CARBONE, O. y MARTINEZ, R. 2011. “El Grupo Cuyo (Jurásico Temprano-Medio) en la Cuenca Neuquina”. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. 77-89. Neuquén.
- BERTONI, L. y DUFILHO, A. C. 2016. Caracterización hidrogeoquímica de acuíferos de la región noreste de la provincia de Neuquén. 9º Congreso Argentino de Hidrogeología y 7º Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad del Agua Subterránea, 264- 271.
- BONORINO, A. G. y PANARELLO, H. O. 1984. Isótopos estables del oxígeno en el agua del acuífero profundo de Bahía Blanca. Asociación Geológica Argentina. Revista XXXIX (1-2): 107-117.
- BRASSINGTON, R. 1995. Field Hydrogeology. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK. 175 pp.
- CABRERA, A. E. 2009. Evolución hidrogeoquímica e isótopos ambientales del sistema acuífero asociado a los ambientes morfotectónicos de la falla regional Tigre Muerto. Córdoba. Argentina. Tesis doctoral. 372pp.
- CALVO, J. O. y RIVERA, C. 2017. Huellas de dinosaurios en la costa oeste del embalse Ezequiel Ramos Mexía y alrededores (Cretácico Superior, Provincia de Neuquén, República Argentina). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 2018. VOL. 70. N°2: 449 – 497.
- CARRETERO, S. C. 2011. Comportamiento hidrológico en las dunas costeras en el sector nororiental de la provincia de Buenos Aires. Tesis doctoral. 436pp.
- CLARK, I. 2015. Groundwater geochemistry and isotopes. CRC Press/ Taylor & Francis. Group, Boca Raton/London/New York. 438pp.
- COPADE, 2002. Elaboración de Bases para el Ordenamiento territorial Ambiental de la Provincia del Neuquén. Sistema de Información Geográfico (SIG-OTA). Autores: Dufilho, A. C., Toth, A. y Valle, D. COPADE-CFI, 3 Vol., 23 planos, base de datos en ArcView.
- CRAIG, H. 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. Science. 133 (3465), 1702-1703.
- CRISTALLINI, E.O., MARTÍNEZ, J.M., SANCHEZ, E., PERIALE GÓMEZ, S. y LONCARICH, A. 2005. Evaluación estructural del bloque Bandurria (Provincia del Neuquén, Argentina). YPF. 73pp. Informe inédito.
- 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, N° 4, 329-346.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. 1983. Hidrología Subterránea. Tomo I y II. Ediciones Omega S.A. 1157pp. Barcelona, España.



- DANSGAARD, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- DAPEÑA, C. y PANARELLO, H. O. 1995. Preliminary Isotopic Study of the Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. Informe presentado en First Research Coordination Meeting of the IAEA. Coordinated Research Programme (CRP) on "Isotope Techniques in Lake Dynamics Investigations". 7 pp. Large Lakes Observatory, University of Minnesota, Duluth, USA.
- DAPEÑA C. y PANARELLO, H. O. 1999. Development of the National Network for Isotopes in Precipitation of Argentina. II South American Symposium on Isotope Geology, ACTAS, 503-508.
- DAPEÑA C. y PANARELLO, H. O. 2002. Red nacional de colectores de isótopos en precipitaciones en Arg.: Su importancia en estudios Hidrogeológicos. *Aguas Subt. y Desarrollo Humano*. Bocanegra, E., Martínez, D., Massone, H. (Eds.), Vol. (CD), 1053-1060. Mar del Plata.
- DAPEÑA, C., y PANARELLO, H.O., 2004. Composición isotópica de la lluvia de Buenos Aires. Su importancia para el estudio de los sistemas hidrológicos pampeanos. *Revista Latino- Americana de Hidrogeología*, N.4, 17-25.
- DAPEÑA, C. y PANARELLO, H.O. 2008a. Isotope composition of precipitation in Bariloche city, Río Negro. Argentina. En: Linares, E., Cabaleri, N., G., Do Campo, M. D., Ducós, E. I. y Panarello, H.O. (Compilers). VI South American Symposium on Isotope Geology, Proceedings in CD-ROM, paper 151. 7pp.
- 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. 8p. Quito, Ecuador.
- DAPEÑA, C. y PANARELLO, H.O. 2011. Composición isotópica de precipitaciones en el noroeste argentino. VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad y Contaminación de Agua Subterránea Salta, Argentina. 385-392.
- DAPEÑA, C., SCHULZ, C., PANARELLO, H. O., DORNES P. y DALMASSO, G., 2002. Estudio Isotópico preliminar del acuífero del Valle Argentino, La Pampa, Argentina. *Aguas Subterráneas y Desarrollo Humano*. XXXII IAH & VI ALHSUD Congreso. 1062-1069. Mar del Plata.
- DOMENICO, P. A. y SCHWARTZ, F.W. 1998. *Physical and Chemical Hidrogeology*, 2ª edición, John Wiley & Sons, Inc. 494 pp.
- FIORI S.M. y ZALBA, S. M. 2000. Plan de Manejo Reserva Provincial Auca Mahuida (Neuquén). Volumen I – Diagnóstico Regional. Secretaría de Estado del COPADE y Consejo Federal de Inversiones. 205 pp.
- FONTES, J.C. 1986. Environmental isotopes in groundwater hydrology, in *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. Vol. I by Fritz P. y Fontes J. C. 75-140.
- FRITZ, P., FONTES, J.C. 1980. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, 1. The Terrestrial Environment: Elsevier, 545 pp.
- GARRIDO, A. 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. *Rev. Mus. Argentino Cienc. Nat.*, n.s. 12(2): 121-177.
- GARRIDO, A. 2011. El Grupo Neuquén (Cretácico tardío) en la Cuenca Neuquina. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, 231-244. Neuquén.



- GAT, J. y GONFIANTINI, R. 1981, Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle: Technical Reports Series, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria, 210 pp.
- 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. 98pp.
- GIUSANO, A., CEVALLOS, M., FRANCHINI, M., CARBONE, O. y RAINOLDI, A. 2014. Evidencias de la circulación de hidrocarburos a través del Grupo Neuquén (Cretácico Superior) en el Dorso Los Chihuidos, Cuenca Neuquina. XIX Congreso Geológico Argentino. Córdoba. Geología de los recursos energéticos. T4-1.
- GONFIANTINI, R. 1986. Environmental isotopes in lake studies, in Handbook of environmental isotope geochemistry. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. Vol. 2 by Fritz P. y Fontes J.C., 113-168.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I., FERRER, M., ORTUÑO, L. y OTEO, C. 2002. Ingeniería geológica. Pearson educación. 715 pp. Madrid.
- HERRERO DUCLOUX, A. 1947. Los depósitos terrestres del Cretácico Medio y Superior del Neuquén y Sur de Mendoza. Boletín de Informaciones Petroleras 171-178.
- HERRERO DUCLOUX, A., 1946; Contribución al conocimiento geológico del Neuquén extraandino. Bol. Inf. Petrol., 266: 245-280.
- HOEFS, J. 1987. Stable Isotope Geochemistry. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 3ª edición. 987 pp.
- IRISARRI, J., 2006. Suelos de la provincia del Neuquén. Escala 1:500.000. INTA-CFI-UN del Comahue, 224 pp. Buenos Aires.
- LEANZA, H.A. HUGO, C. A y REPOL, D. 2001. "Hoja Geológica 3969-I Zapala". Provincia del Neuquén. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 275.128 pp. Buenos Aires.
- LERNER, D.N., 1990. Techniques. En: Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH. 99-229.
- LILLO, J. 2007. Técnicas Hidrogeoquímicas. Tesis (en opción del título de Máster Oficial en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos), Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España. 140pp.
- LUCIONI, N C. 2014. Sistemas de Información Geográfica aplicados a la actividad agropecuaria. 1ª edición. Subsecretaría de Agricultura. Buenos Aires. 101pp.
- MAS, L.C. 2013. "Geoquímica" – Su origen. Evolución. Relaciones con otras disciplinas. Metodologías de estudio. Apunte inédito de referencia de la asignatura Geoquímica de la carrera de Licenciatura en Ciencias Geológicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue. PEDCO FAIN.
- MEBUS, G. 2000. Groundwater. Saturated and unsaturated zone, in: Environmental isotopes in the hydrological cycle Principles and applications, by Mook W.G. UNESCO Paris, International Hydrological Programme. UNESCO and IAEA, IHP-V Technical Documents in Hydrology No. 39, Vol. IV, 196pp.
- 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. 9º Congreso Argentino de Hidrogeología y 7º Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Hidrogeología regional: 228-237.



- MICUCCI, E., BANDE, A., STARCK, D. y VEIGA, R. 2018. El Jurásico del Dorso Los Chihuidos, contribución a su conocimiento. 10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Sesiones Generales: “Energía y Sociedad, aliados inseparables”. 437- 460.
- MOOK, W. G. 2002. Isótopos ambientales en el ciclo hidrogeológico: principios y aplicaciones. IGME. Madrid, 596pp.
- MOVIA C., OWER G. y PEREZ C. 2007. Estudio de la Vegetación Natural de la Provincia del Neuquén. Tomo I, II y III. Min. de Economía y Hacienda Prov. De Neuquén.
- PANARELLO, H. y PARICA, C. 1984. Isótopos del oxígeno en hidrogeología e hidrología. Primeros valores en aguas de lluvia. Asoc. Geol. Arg. XXXIX (1-2): 3-11. Buenos Aires.
- PEREYRA, F.X., IRISARRI, J.A. y FERRER, J.A., 2011. Suelos: factores de formación, procesos pedogenéticos y distribución. 18º Congreso Geológico Argentino. Relatorio 871-880, Neuquén.
- PEREZ QUEZADAS, J., CORTÉS SILVA, A., SALAS ORTEGA, M. R., ARAGUÁS, L., MORALES PUENTES, P. y CARRILLO CHAVÉZ, A. 2017. Evidencias hidrogeoquímicas e isotópicas sobre el origen del agua subterránea en la cuenca hidrográfica Río Actopan, Estado de Veracruz. Vol. 3.4. N°1. 25-37.
- PLATA, B.A. 1996. Generalidades sobre isótopos estables del agua. Curso sobre hidrología, 1ª Edición Universidad Autónoma de Madrid, España.
- PONCE, J., ZAVALA, C., MARTEAU, M., y DRITTANTI, D. 2002. Análisis estratigráfico y modelo deposicional para la Formación Rayoso (Cretácico Inferior) en la Cuenca Neuquina, Provincia del Neuquén. En: Cabaleri, N., Cingolani, C.A., Linares, E., López de Luchi, M.G., Ostera, H.A. y Panarello, H.O. (Eds.). Actas del XV Congreso Geológico Argentino. Artículo N° 235. 6pp.
- RODRIGUEZ, E. 1990. “Las cárceles” y su significado en la evolución geomorfológica del anticlinal Los Chihuidos, Neuquén. Boletín de Estudios Geográficos, N° 86, 129-141.
- SÁNCHEZ SAN ROMÁN, F. J. 2012. Hidráulica Subterránea: Principios básicos. Universidad de Salamanca. 13 pp. (En: <http://hidrologia.usal.es>)
- SÁNCHEZ SAN ROMÁN, F.J. 2014a. Hidroquímica: Conceptos elementales. Universidad de Salamanca. 11 pp. (En: <http://hidrologia.usal.es>)
- SÁNCHEZ SAN ROMÁN, F.J. 2014b. Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. Universidad de Salamanca. 11pp. (En: <http://hidrologia.usal.es>)
- STICCO, M. 2014. Informe Tests iniciales del Pozo de agua AP.ww3. Ensayos de bombeo iniciales. Total Austral S.A, Neuquén. Informe inédito. 23pp.
- STICCO, M. 2015. Informe Tests de bombeo del Pozo de agua AP.ww4. Total Austral S.A, Neuquén. Informe inédito. 27pp.
- TCHILINGUIRIAN, P. 2014. Hidrogeología del Yac. El Trapial, con énfasis en el Grupo Neuquén. Informe inédito. 115pp.
- TOGNOLI, P. N., MARTINEZ, D. E. e IBAÑEZ, S. 2018. Aportes al modelo hidrogeológico de la zona del Abanico de Agrelo, Cuenca Norte, provincia de Mendoza. El Agua Subterránea: “Recurso sin Fronteras”. Hidrogeología Regional Volumen II: 85-92.
- TUNIK, M., FOLGUERA, A., NAIPAUER, 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.
- ULIANA, M.A., DELLAPÉ, D.A. y PANDO, G.A. 1975a. Distribución y génesis de las sedimentitas rayosianas. (Cretácico inferior de las provincias de Neuquén y Mendoza). 2º Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 1: 151-176. Buenos Aires.



- ULIANA, M.A., DELLAPÉ, D.A. y PANDO, G.A. 1975b. Estratigrafía de las sedimentitas rayosianas. (Cretácico inferior de las provincias de Neuquén y Mendoza). 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 1: 177-196. Buenos Aires.
- VALENZUELA, L., RAMIREZ HERNANDEZ, J. y PALOMARES, R. 2013. Composición Isotópica del Agua Subterránea y su Relación con la Salinidad en el Valle de San Luis. Río Colorado en Sonora, México. Inf. tecnol. [online]. Vol. 24, n.2: 54 – 66.
- VEN TE CHOW, MAIDMENT, D. R. y MAYS, L. W. 1994. Hidrología Aplicada. Mc Graw- Hill Interamericana. 584pp.
- ZAMORA VALCARCE, G., ZAPATA, T., RAMOS, V.A., RODRIGUEZ, F. y BERNARDO, L.M. 2009. Evolución tectónica del frente Andino en Neuquén: Revista Asociación Geológica Argentina, 65 (1): 192-203.
- ZAVALA, C. y PONCE, J. 2011. La Formación Rayoso (Cretácico temprano) en la Cuenca Neuquina. En Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J. y Vallés, J. (Eds.) Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino: 205-222, Neuquén.