



Universidad Nacional de La Plata

Facultad de Ciencias Naturales y Museo

DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES

Tesis Doctoral

**“EL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL NORESTE DE LA
PAMPA. CICLO GEOQUÍMICO DEL ARSÉNICO”**

Ing. Natalia Ana Lis LOYOLA

Director: Dr. Carlos Juan SCHULZ

Directora: Dra. Patricia Claudia LAURENCENA

2023

Dedicado a mi ángel,

Gregorio.

Agradecimientos

En primer lugar mi mayor agradecimiento es a mi director de tesis y beca doctoral Dr. Carlos Schulz, quien alentó, apoyó y ayudó en el transcurso de este recorrido. A mi directora de tesis Dra. Patricia Laurencena por aceptar ser parte de este equipo, por sus aportes en cada informe de avance, correcciones y asesoramiento. A mis jurados, Dr. Eduardo Kruse, Dr. René Albouy y Dr. Rodolfo García, por cada sugerencia y corrección para mejorar esta tesis. Un especial reconocimiento y dedicatoria a Rodolfo, excelente profesional y persona, respetable y admirable por sus extensos conocimientos en hidrogeología, y agradecerle por su continuo apoyo en esta tesis. Su memoria seguirá viva por siempre en nuestros corazones.

A la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la UNLP por darme la oportunidad de lograr este título. Como también agradecer a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UNLPam que me abrió sus puertas para brindarme un lugar de trabajo.

A la Cooperativa de Servicios Públicos de Arata (COSEPAR) y a la Municipalidad de Arata por brindarme el espacio y las herramientas para armar la Estación Hidrometeorológica, y hospedaje durante las campañas en su localidad. En especial a Carlos Santarrosa por su continuo interés en ayudar y proporcionar lo necesario para llevar a cabo esta tesis, y a Rodolfo Vanderhoeven que se puso al hombro la colección de muestras de precipitaciones, que sin duda alguna esta tesis no hubiera sido posible sin la ayuda de ambos.

Al Lic. Germán Morazzo que me enseñó y brindó toda su ayuda, compromiso, tiempo y paciencia en el uso del equipamiento y aplicación de técnicas durante los procedimientos realizados en el laboratorio, que sin él hubiera sido imposible efectuarlos. Al Dr. Eduardo Mariño que me acercó bibliografía y brindó ayuda en la interpretación de los resultados.

A la Administración Provincial del Agua (APA) por brindarme las herramientas para contar con una perforación de estudio, en especial al Ing. Andrés Castiñeyra por su predisposición a participar y ayudar en esta tesis, a la Mg. Carina Arroyo que dirigió la perforación y acompañó en múltiples campañas de muestreo, y a los perforistas que la llevaron a cabo. Agradecer también a Carlos Gandi por su ayuda continua en la colecta de información freaticométrica y climática de la zona, como también al Ing. Christian Montagna que además, ayudó en la redacción y corrección de esta tesis.

Al Lic. Carlos Camilletti por su apoyo constante y su participación en esta tesis realizando la descripción litológica de los sedimentos extraídos. Al Laboratorio de Suelos del INCITAP, en especial a la Lic. Claudia Montoya por efectuar los distintos análisis en los sedimentos, y por enseñarme y ayudarme a utilizar

equipamiento del laboratorio. Al Dr. Marcelo Zarate y a la Dra. Florencia Lorenzo por su aporte bibliográfico de geomorfología de la zona y brindarme su tiempo para explicaciones y charlas.

A mis colegas, compañeros, amigos y estudiantes que me acompañaron en los tantos kilómetros que implicó llevar a cabo las campañas de muestreo, de prospección geofísica y de revisión y colección de muestras de la estación de Arata: Ing. José María Galea, Mg. Mariano Cáceres, Mg. Eliana Saguas, Lic. Mauro Braun, Dra. Lorena Ceballo, Lic. Raúl Celador y a las futuras Licenciadas Sofía Ojeda y Noella Hurtado.

A las chichis del Pabellón Sur con quienes compartí largas charlas de tesis, y me bancaron las crisis siempre con risas y continuo apoyo: Clau, Andre, Fani, Cami, Flor, Vivi, Vani, Ro, Adri, Lore, Marian. A mis amigos de siempre por estar presente en cada logro y darme aliento: Aye, Georgi, Mely, Romi, Flor, Wally, Ale, Lean, Nana. A mi amiga Pau que desde que la conozco es mi sostén diario y me banca en todas, con mis quejas, alegrías, llantos y a pesar de la distancia está en cada paso que doy.

A mi familia, siempre eternamente agradecida por tantos años de aguante. A mis padres, mis hermanos, cuñados/as y mis sobrinas que siempre me acompañaron en cada etapa. A mi sobrina Cami por su aguante diario, cebada de mates y cenas ricas durante la etapa final de redacción. A Graciela por las largas mañanas y tardes de tesis en su casa y sus ricas comidas. A Santi, que estuvo firme este año para acompañarme, contenerme y abrazarme en esta eterna etapa final.

Y por último y no menos importante a mi ángel Gregorio que fue el mejor y más hermoso y peludo compañero que pude tener, que estuvo presente en cada tecla presionada, y que sin él mi historia hubiera sido diferente, eternamente agradecida con mi minino. Y a mí gorda hermosa, mi Mamushka que apareció cuando menos la esperaba para alegrarme cada día y acompañarme siempre cerquita del teclado en esta última etapa.

A todos/as muchas gracias, sin ustedes no hubiera sido posible.

Resumen

El agua es el recurso primordial para el desarrollo de la vida, y debe considerarse parte fundamental del ecosistema. El ser humano es el principal consumidor de agua en el mundo, y lo hace para satisfacer necesidades básicas y de desarrollo socioeconómico. En Argentina, más de la mitad de su territorio es árido o semiárido, lo cual provoca una marcada escasez de recursos hídricos superficiales, siendo el agua subterránea clave para abastecer las demandas hídricas. La provincia de La Pampa no es ajena a esta situación, por lo que presenta una fuerte dependencia del recurso subterráneo. El agua subterránea se moviliza a través de una formación geológica con características físicas favorables para su circulación y almacenamiento, por lo que el tiempo de contacto agua-sedimento o roca, le otorga sus principales características químicas. En áreas de llanura, este tiempo de contacto se ve favorecido, dada a la predominancia de movimientos verticales (infiltración-evapotranspiración) por sobre los horizontales (escurrimiento superficial y subterráneo), conformando importantes acuíferos como es el caso del Acuífero Pampeano. Este reservorio abarca el noreste y centro de La Pampa, y la formación geológica de mayor importancia hidrogeológica es la Formación Cerro Azul, que está conformada por una secuencia sedimentaria loésica cuaternaria, que presenta un estrato de carbonato de calcio denominado tosca, y material de origen volcánico proveniente de erupciones Andinas, cuya disolución es una de las principales consecuencias que origina los acuíferos arseníferos del país.

El objetivo principal de esta tesis es realizar un modelo conceptual hidrogeológico e hidrogeoquímico que permita evaluar el funcionamiento del Acuífero Pampeano en sentido del flujo subterráneo y reconocer el comportamiento espacial del arsénico en relación a las fases portadoras, en un área al noreste de la provincia de La Pampa. Se efectuaron tareas de recopilación de información, una perforación de exploración, colecta de muestras de agua de lluvia y subterránea, medición de niveles freáticos, prospección geofísica, procedimientos secuenciales de extracción de arsénico en sedimentos, entre otros.

El área de estudio se extiende en una zona climática semiárida a subhúmeda de SO a NE con características continentales, y una precipitación media anual de 660 mm. Al oeste abarca parte de la Región Hídrica de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos y hacia el este forma parte de la Planicie Pampeana Central. Los cálculos de recarga determinaron una recarga media anual de 54 mm en la zona de Ingeniero Luigi para el período 1998-2017.

El basamento cristalino del Acuífero Pampeano se encuentra a profundidades muy variables como resultado de los numerosos ciclos orogénicos asociados a la formación de la Llanura Chacopampeana, lo que podría ejercer un control sobre la hidrodinámica del flujo subterráneo. Estos factores generaron que, se definiera una profundidad del basamento a los 230 m desde la localidad de Arata hasta alcanzar los 700 m en el pueblo La Maruja. El flujo subterráneo

regional se moviliza de oeste a este coincidente con la topografía, mientras que los flujos locales son más variables. Se obtuvo que los mayores potenciales hidráulicos se ubican en la zona de médanos al suroeste, y en una franja noreste desde el norte de la localidad de Eduardo Castex, hacia los pueblos de Arata y Caleufú. El flujo local se moviliza hacia la localidad de La Maruja y hacia el sur en el pueblo de Conhelo.

La hidroquímica resultó muy variable con respecto al contenido aniónico, mientras que el único catión dominante en toda la zona de estudio es el sodio. Predominan dos tipos de agua, del tipo bicarbonatadas sódicas en las zonas de potenciales hidráulicos más elevados, incluyendo zonas de médanos y áreas sin médanos con pozos someros, y por el otro las aguas del tipo cloruradas sódicas hacia zonas de potenciales hidráulicos más profundos. Los principales procesos hidrogeoquímicos que dominan son la disolución de halita, yeso y carbonatos (sales evaporíticas) y el intercambio de bases de ablandamiento. Los índices de saturación indican que la remoción de calcio del agua también podría estar dada por la precipitación de calcio. El agua subterránea se encuentra en equilibrio con minerales arcillosos del grupo de los feldespatos potásicos, caolinitas y montmorillonitas sódicas y cálcicas. La composición isotópica del agua de lluvia y subterránea sugiere que en zona de médanos y en áreas sin médanos con pozos someros, el agua de lluvia infiltra directamente, manteniendo la composición. Se detecta una línea de evaporación relacionada con procesos de evaporación directos desde el nivel freático, y otra que sugiere evaporación previa a la infiltración por retención de agua en la tosca.

Respecto al contenido de oligoelementos en la zona estudiada, las mayores concentraciones se detectaron en arsénico (As), fluoruro, estroncio y vanadio. Los primeros dos presentaron una media en la región analizada de 233 µg/L y 5 mg/L, con máximos que alcanzaron los 790 µg/L y 17 mg/L respectivamente. En relación al análisis de especiación de As, el As^{5+} resultó ser el de mayor predominancia en la totalidad del área de estudio. El As^{3+} fue detectable solo en dos muestras con valores de 5 µg/L y 40 µg/L, representando un 9% del total de As. Como resultado de los procedimientos de extracción de arsénico, se obtuvo que las principales fases portadoras son los carbonatos a partir de la desorción y/o disolución, y los óxidos e hidróxidos de manganeso y hierro.

Según su calidad las aguas fueron clasificadas como no aptas para consumo humano por las elevadas concentraciones de arsénico y fluoruro. Mientras que para consumo ganadero, el 90% son clasificadas como muy buenas/buenas dado a su elevado contenido de sales. Sin embargo, para riego presentan un alto/muy alto peligro de sodificación y salinización del suelo. Se considera que las herramientas aplicadas en esta tesis, fueron suficientes para determinar el funcionamiento del sistema hidrogeológico del área de estudio.

Palabras Claves: hidrogeología, Acuífero Pampeano, hidrogeoquímica, arsénico.

Abstract

Water is the primary resource for the development of life, and must be considered a fundamental part of the ecosystem. Human beings are the main consumer of water in the world, and do so to satisfy basic needs and socioeconomic development. In Argentina, more than half of its territory is arid or semi-arid, which causes a marked shortage of surface water resources, with groundwater being key to supplying water demands. The province of La Pampa is no stranger to this situation, which is why it is highly dependent on underground resources. Groundwater is mobilized through a geological formation with favorable physical characteristics for its circulation and storage, so the water-sediment or rock contact time gives it its main chemical characteristics. In plain areas, this contact time is favored, given the predominance of vertical movements (infiltration-evapotranspiration) over horizontal ones (surface and underground runoff), forming important aquifers such as the Pampean Aquifer. This reservoir covers the northeast and center of La Pampa, and the geological formation of greatest hydrogeological importance is the Cerro Azul Formation, which is made up of a quaternary loessic sedimentary sequence, presenting material of volcanic origin from Andean eruptions, whose dissolution is one of the main consequences that gives rise to the arseniferous aquifers of the country, and also presents a stratum of calcium carbonate called toasca.

The main objective of this thesis is to carry out a conceptual hydrogeological and hydrogeochemical model that allows evaluating the functioning of the Pampean Aquifer in the direction of underground flow and recognizing the spatial behavior of arsenic in relation to the carrier phases, in an area northeast of the province of La Pampa. Information collection tasks were carried out, including exploratory drilling, collecting rainwater and groundwater samples, measuring groundwater levels, geophysical prospecting, and sequential procedures for extracting arsenic in sediments, among others.

The study area extends in a semiarid to subhumid climatic zone from SW to NE with continental characteristics, and an average annual precipitation of 660 mm. To the west it covers part of the Hydrological Region of the Longitudinal Plain with Dune Depressions, and to the east it is part of the Central Pampean Plain. Recharge calculations determined an average annual recharge of 54 mm in the area of Ingeniero Luiggi for the period 1998-2017.

The crystalline basement of the Pampean Aquifer is found at very variable depths as a result of the numerous orogenic cycles associated with the formation of the Chacopampean Plain, which could exert control on the hydrodynamics of the underground flow. These factors generated that a depth of the basement was defined at 230 m from the town of Arata, until reaching 700 m in the town of La Maruja. The regional underground flow moves from west to east coinciding with the topography, while local flows are more variable. It was obtained that the greatest hydraulic potentials are located in the dune area located to the southwest, and in a northeast strip from the north of the

town of Eduardo Castex, towards the towns of Arata and Caleufú. The local flow moves towards the town of La Maruja and towards the south in the town of Conhelo.

The hydrochemistry was very variable with respect to the anionic content, while the only dominant cation in the entire study area is sodium. Two types of water predominate, the sodium bicarbonate type in areas of higher hydraulic potential, including areas of dunes and areas without dunes with shallow wells, and on the other hand, the sodium chlorinated type waters towards areas of deeper hydraulic potential. The main hydrogeochemical processes that dominate are the dissolution of halite, gypsum and carbonates (evaporitic salts) and the exchange of softening bases. The saturation indices indicate that the removal of calcium from water could be given by calcium precipitation. The groundwater is in balance with clay minerals from the group of potassium feldspars, kaolinites and sodium and calcium montmorillonites. The isotopic composition of rainwater and groundwater suggests that in dune areas and in areas without dunes with shallow wells, rainwater infiltrates directly, maintaining the composition. An evaporation line is detected related to direct evaporation processes from the water table, and another that suggests evaporation prior to infiltration due to water retention in the *tosca*.

Regarding the content of trace elements in the studied area, the highest concentrations were detected in arsenic (As) and fluoride, strontium and vanadium. The former presented an average in the analyzed region of 233 µg/L and 5 mg/L, with maximums that reached 790 µg/L and 17 mg/L respectively. In relation to the analysis of As speciation, As⁵⁺ turned out to be the most predominant in the entire study area. As³⁺ was detectable only in two samples with values of 5 µg/L and 40 µg/L, representing 9% of the total As. As a result of the arsenic extraction procedures, it was obtained that the main carrier phases are carbonates from desorption and/or dissolution, and oxides and hydroxides of manganese and iron.

According to its quality, the waters were classified as unfit for human consumption due to the high concentrations of arsenic and fluoride. While for livestock consumption, 90% of waters were classified as very good/good given their high salt content. However, for irrigation they present a high/very high danger of sodification and salinization of the soil. It is considered that the tools applied in this thesis were sufficient to determine the functioning of the hydrogeological system of the study area.

Keywords: hydrogeology, Pampean Aquifer, hydrogeochemistry, arsenic.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
1.2	Fundamentos de la elección del tema	3
1.3	Fundamentos de la elección del área de trabajo	4
1.4	Área de estudio	6
1.5	Objetivos	9
1.6	Hipótesis	9
1.7	Antecedentes y estado del arte	10
2	MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1	Revisión de antecedentes	13
2.2	Tratamiento hidrometeorológico	14
2.3	Tratamiento sedimentológico	16
2.4	Tratamiento hidrodinámico	18
2.5	Tratamiento hidroquímico e isotópico	20
2.5.1	Precipitaciones	20
2.5.2	Agua subterránea	22
2.6	Metodología para el cálculo de la recarga	24
2.7	Método geofísico del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)	25
2.8	Procedimiento de Extracciones Secuenciales (PES).	27
3	CLIMATOLOGÍA	31
3.1	Clima Regional	31
3.2	Clima Local	37
3.3	Precipitación	38
3.3.1	Verificación y ajuste de datos pluviométricos	38
3.3.2	Precipitación media anual del área	41
3.3.3	Comportamiento pluviométrico	41
3.4	Temperatura	47
3.5	Evapotranspiración	48
3.6	Humedad Relativa	50
3.7	Vientos	51
3.8	Balance Hídrico	52
4	GEOLOGÍA	55

4.1	Marco Geológico Regional	55
4.2	Marco Geológico Local.....	61
4.2.1	Sistema de Estructuras.....	62
4.2.2	Estratigrafía	75
4.2.2.1	Descripciones litológicas	75
4.2.2.2	Columna estratigráfica del área de estudio	81
4.2.2.3	Mineralgía de los sedimentos de área de estudio	84
5	GEOMORFOLOGÍA, HIDROLOGÍA Y SUELOS.....	86
5.1	Marco Geomorfológico Regional	86
5.2	Geomorfología Local.....	88
5.2.1	Unidad Geomorfológica de las Acumulaciones Arenosas combinadas con Mesetas Residuales	89
5.2.2	Unidad Geomorfológica de la Planicie con Tosca	90
5.3	Hidrología superficial.....	91
5.4	Suelos	100
6	HIDROGEOLOGÍA.....	103
6.1	Introducción.....	103
6.1.1	Región de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos.....	104
6.1.2	Región de la Planicie Pampeana Central	104
6.2	Parámetros Hidráulicos	105
7	PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	107
7.1	Marco Teórico	107
7.2	Perfiles Geoeléctricos	109
7.2.1	SEV 1 (Arata).....	109
7.2.2	SEV 2 (Escuela Los Hornos)	110
7.2.3	SEV 3 (Caleufú).....	111
7.2.4	SEV 4 (Entre Caleufú y Pichi Huinca).....	113
7.2.5	SEV 5 (Pichi Huinca)	115
7.2.6	SEV 6 (La Maruja)	116
7.2.7	SEV 7 (Ingeniero Foster)	118
7.3	Interpretación del Perfil Geofísico	119
8	HIDRODINÁMICA	121
8.1	Marco Regional	121
8.2	Piezometría	125

8.3	Fluctuaciones del nivel freático	128
9	RECARGA	131
9.1	Introducción.....	131
9.2	Balance hídrico en el suelo	133
9.2.1	Aplicación del Balance Hídrico del Suelo	135
9.3	Método de las Fluctuaciones del nivel freático	137
9.3.1	Análisis de las fluctuaciones del nivel freático	138
9.4	Balance del ion Cloruro	139
9.4.1	Aplicación del Balance del ion cloruro	139
9.5	Valores de Recarga.....	140
10	HIDROQUÍMICA.....	142
10.1	Composición fisicoquímica de las precipitaciones	142
10.2	Composición fisicoquímica del agua subterránea	144
10.2.1	Distribución espacial de la conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos	147
10.2.2	Análisis de los componentes mayoritarios.....	150
10.2.3	Análisis de componentes traza.....	154
10.2.4	Distribución espacial y temporal del arsénico y fluoruro.....	155
10.2.5	Especiación de arsénico.....	166
10.2.6	Análisis de correlación lineal	168
10.2.7	Clasificación hidroquímica.....	171
10.2.8	Análisis de las relaciones iónicas	177
10.2.9	Diagramas de campos de estabilidad	182
10.2.10	Índices de Saturación	186
11	ISOTOPIA AMBIENTAL	190
11.1	Introducción	190
11.2	Composición isotópica de las precipitaciones.....	192
11.2.1	Composición isotópica local	193
11.3	Composición isotópica del agua subterránea	201
12	FASES PORTADORAS DE ARSÉNICO	206
12.1	Introducción	206
12.2	Muestras de sedimentos	208
12.3	Extracciones secuenciales (PES) de arsénico.....	210
13	CALIDAD DE AGUA.....	213

13.1	Aptitud del agua para consumo humano	213
13.2	Aptitud para consumo ganadero	216
13.3	Aptitud para riego.....	218
14	MODELO CONCEPTUAL.....	221
14.1	Introducción	221
14.2	Modelo Hidrogeológico Conceptual	221
15	CONCLUSIONES.....	228
16	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	239
	ANEXO.....	257

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio. RH: Región Hídrica.	7
Figura 2. Distribución de cartas topográficas del IGN que abarca el área de estudio, a escala 1:100.000.....	13
Figura 3. Ubicación de los establecimientos rurales donde se extrajeron muestras de agua.....	23
Figura 4. Arreglo del método de Schlumberger.....	25
Figura 5. Ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV) en el área de estudio.....	26
Figura 6. Isohietas de precipitación anual de la Argentina para el período 1981-2010 (extraído de Gentile <i>et al.</i> , 2020).....	33
Figura 7. Isohietas de la provincia de La Pampa para las distintas estaciones del año (otoño, primavera, invierno, verano) del período 1981-2010 (extraído de Gentile <i>et al.</i> , 2020).....	35
Figura 8. Tipos de Climas de la Provincia de La Pampa. Extraído de Gentile <i>et al.</i> (2020).....	36
Figura 9. Análisis de Doble Masa de las estaciones pluviométricas de las localidades dentro del área de estudio.....	39
Figura 10. Análisis de Doble Masa entre la estación pluviométrica de la localidad de Pichi Huinca y la “Estación Base”. Determinación de las pendientes Po y Pd para determinar el Factor de Corrección del período 2012-2019.	40
Figura 11. Análisis de Doble Masa entre la estación de Pichi Huinca y la “estación Base” posterior a la corrección de los registros del período 2012-2019.	40
Figura 12. Polígonos de Thiessen del área de estudio, correspondientes al período 1928-2019.	41
Figura 13. Percentiles utilizados para determinar las épocas secas, normales y secas para cada estación pluviométrica (García de Pedraza y Ruíz, 1989). ...	42
Figura 14. Precipitación anual (P Anual) acumulada para el período 1928-2019 con distinción de épocas muy húmedas (MH), húmedas (H), normales (N), secas (S) y épocas muy secas (MS). a) Ingeniero Foster; b) Arata; c) Eduardo Castex; d) Rucanelo.....	44
Figura 15. Hidrograma de precipitación media mensual (mm) del período 1928-2019. a) Ingeniero Foster; b) Arata; c) Eduardo Castex; d) Rucanelo.....	46
Figura 16. Variación de la temperatura mensual del período 1998-2019 a partir de los datos provenientes de la estación “Don Osvaldo”.	47
Figura 17. Variación de la temperatura anual del período 1998-2019 a partir de los datos provenientes de la estación “Don Osvaldo”.	48
Figura 18. Valores de ETo según método de Penman Monteith y ETP según Thornthwaite, a partir de los datos de la Estación Meteorológica “Don Osvaldo”.	49

Figura 19. Variación de la ETo mensual del período 1998-2019 calculada con el método de Penman-Motheith a partir de los datos provenientes de la estación “Don Osvaldo”.....	50
Figura 20. Variación mensual de la humedad relativa (%) correspondiente al período 1998-2017 a partir de los datos de la estación meteorológica “Don Osvaldo”.....	51
Figura 21. Frecuencia acumulada de la dirección predominante del viento a distintas velocidades (km/h).	52
Figura 22. Velocidad del viento media mensual para el período 1998-2017....	52
Figura 23. Balance Hídrico de la localidad de Arata para el período 1998-2018.	54
Figura 24. Provincia geológica “Llanura Chacabonaense” y sus principales depocentros y cuencas sedimentarias. Tomado de Ramos (1999a).....	56
Figura 25. Delimitación de terrenos acrecionados en la región austral tomado de Chernicoff y Zappettini (2004).	57
Figura 26. Sistemas extensionales desarrollados durante el Cretácico inferior. Sistema de rift pampeano central. Tomado de Ramos (1999b).	59
Figura 27. Mapa ilustrativo del área cubierta por el Mar Paranaense durante el Mioceno medio. Tomado de Folguera y Zarate (2011).	60
Figura 28. Límites estructurales de la Cuenca de Macachín según Salso (1966).	62
Figura 29. Conexión probable entre la cuenca de Quehué (azul) y la extensión probable de la cuenca de Laboulaye (amarillo) a partir de anomalías gravimétricas de Bourguer. Isolíneas de anomalías gravimétricas cada 1 miliGal. Tomado de Kostadinoff y Llambías (2002).....	64
Figura 30. Ubicación de las cuencas sedimentarias de La Pampa extraído y modificado de Kostadinoff y Llambías (2002), señalando el área de estudio (rojo).	65
Figura 31. Configuración de los rift triásicos y cretácicos del centro de Argentina. Tomado de Kostadinoff <i>et al.</i> (2006).....	66
Figura 32. Mapa de anomalías de Bouguer del este de la provincia de La Pampa y las cuencas sedimentarias detectadas. Tomado y modificado de De Elorriaga <i>et al.</i> (2013).....	67
Figura 33. Ubicación del Bloque de la Pampa Central, y otros bloques y cuencas de la provincia de La Pampa y alrededores, extraído de Folguera y Zarate (2009).....	68
Figura 34.. Esquema evolutivo del Mioceno tardío del Bloque de la Pampa Central. Tomado de Folguera y Zarate (2018).	70
Figura 35. Ubicación del sistema de fallas y perfiles propuestos (rojo) por De Elorriaga y Tullio (1998).	71
Figura 36. Perfil estratigráfico SO-NE de Santa Aurelia – Villa Sauze. SO-NE. Tomado de De Elorriaga y Tullio (1998). Paquete IV: Formación Cerro Azul. Paquete III: Formación Macachín. Paquete II: Formación Abramo. Paquete I: Formación Arata.....	72

Figura 37. Ubicación y perfil estratigráfico entre las localidades de La Maruja – Realicó, tomado de De Elorriaga y Tullio (1998). Paquete IV: Formación Cerro Azul. Paquete III: Formación Macachín. Paquete II: Formación Abramo. Paquete I: Formación Arata.....	73
Figura 38. Perfil estratigráfico de La Maruja – Santa Aurelia (O-E), extraído de Ceballo (2020).....	74
Figura 39. Descripción litológica de la perforación de estudio realizada en Arata.....	77
Figura 40. Textura de los sedimentos correspondientes a la litología atravesada en la perforación de Arata.	78
Figura 41. Porcentaje de carbonato (CO_3^{2-}) en sedimentos a distintas profundidades de la perforación de Arata.	79
Figura 42. Valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en sedimentos a distintas profundidades de la perforación de Arata.	79
Figura 43. Columnas litológicas del área de estudio e inmediaciones. R1: Región Hídrica de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos; R2: Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central. NP: Nivel Piezométrico.	80
Figura 44. Cuadro estratigráfico representativo del área de estudio.	82
Figura 45. Paleoformas de origen eólico propuestas por Malagnino (1989). ...	87
Figura 46. Detalle de las dunas longitudinales del área de estudio.....	87
Figura 47. Mapa geomorfológico del área de estudio.	89
Figura 48. Distribución de lagunas en la Región Hídrica de Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1): a) época húmeda (2001); b) época seca (2009). Extraído y modificado de UNLPam (2015).	95
Figura 49. Distribución de lagunas en la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central (R2): c) época húmeda (2001); d) época seca (2009). Extraído y modificado de UNLPam (2015).	97
Figura 50. Distribución de los cuerpos de agua permanentes y temporarios que abarca el área de estudio dentro de las Regiones Hídricas.	98
Figura 51. Distribución de los tipos de suelos en el área de estudio según Cano (1980).	100
Figura 52. Regiones Hídricas y geomorfológicas que abarca el área de estudio.	103
Figura 53. Área de estudio y ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV).	108
Figura 54. Configuración electródica del método de Schlumberger. Extraído de García Maurizzio (2012).	108
Figura 55. Modelo del SEV 1.....	110
Figura 56. Modelo del SEV 2.....	111
Figura 57. Modelo del SEV 3.....	113
Figura 58. Modelo del SEV 4.....	114
Figura 59. Modelo del SEV 5.....	116
Figura 60. Modelo del SEV 6.....	117
Figura 61. Modelo del SEV 7.....	119

Figura 62. Mapa equipotencial regional. Extraído de Ceballo (2020).	122
Figura 63. Mapa piezométrico del norte de la provincia de La Pampa para el período 2014-2015. Extraído y modificado de UNLPam (2015).	124
Figura 64. Variación de la profundidad de los niveles freáticos en el área de estudio.	125
Figura 65. Distribución de los pozos someros y profundos según nivel estático, en el área de estudio y zonas aledañas.	126
Figura 66. Mapa de equipotenciales y dirección de flujo de agua subterránea, y topografía del área de estudio. NP: Nivel Piezométrico.	127
Figura 67. Ubicación de los piezómetros utilizados para el análisis de las fluctuaciones piezométricas.	129
Figura 68. Variación piezométrica del freatómetro ubicado en la localidad de Ingeniero Luiggi.	129
Figura 69. Variación piezométrica del freatómetro ubicado en la localidad de Arata.	130
Figura 70. Esquema del balance hidrológico en el suelo (Samper <i>et al.</i> , 2005).	131
Figura 71. Ubicación del piezómetro, la estación meteorológica y el muestreador de agua de lluvia para determinación de cloruros, para la aplicación de métodos para la estimación de la recarga en la zona.	133
Figura 72. Balance hídrico efectuado a través del software Visual Balan para la localidad de Ingeniero Luiggi.	136
Figura 73. Representación de niveles freáticos óptimos, medidos y calculados en m s.n.m. para el piezómetro de Ingeniero Luiggi.	136
Figura 74. Ajuste de los niveles medidos y calculados.	137
Figura 75. Variación temporal de la precipitación diaria vs. conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	143
Figura 76. Variación temporal de la precipitación diaria vs. pH.	143
Figura 77. Diagrama de Piper correspondiente a las precipitaciones de Intendente Alvear, extraído de Ceballo (2020).	144
Figura 78. Ubicación de las muestras con análisis fisicoquímicos completos extraídas durante campañas de campo y de pozos de abastecimiento de la APA.	145
Figura 79. Diagramas de caja de la CE y los SDT, por la totalidad de muestras y por región.	148
Figura 80. Distribución espacial de los valores de conductividad eléctrica en el área de estudio y zona aledaña.	149
Figura 81. Distribución espacial de los valores de sólidos disueltos totales en el área de estudio y zona aledaña.	149
Figura 82. Diagramas de caja del pH y del ion bicarbonato, según el total de muestras y por región hídrica.	151
Figura 83. Diagramas de caja de los iones cloruro y sodio, según el total de muestras y por región hídrica.	152

Figura 84. Diagrama de caja de sulfato, según el total de muestras y por región hídrica.	152
Figura 85. Diagramas de caja de calcio y magnesio, según el total de muestras y por región hídrica.....	153
Figura 86. Diagrama de caja de potasio, según el total de muestras y por región hídrica.	154
Figura 87. Diagramas de caja de fluoruro y arsénico, según el total de muestras y por región hídrica.....	157
Figura 88. Ubicación y variación temporal de As y F ⁻ en un pozo de abastecimiento de la localidad de Arata, para el período 1996-2017.....	159
Figura 89. Ubicación y variación temporal de As y F ⁻ en un pozo de abastecimiento de la localidad de Caleufú, para el período 1996-2017.....	160
Figura 90. Ubicación y variación temporal de As y F ⁻ en un pozo de abastecimiento de la localidad de Pichi Huinca, para el período 2002-2017.	161
Figura 91. Ubicación y variación temporal de As y F ⁻ en un pozo de abastecimiento de la localidad de La Maruja, para el período 2004-2017.	162
Figura 92. Ubicación y variación temporal de As y F ⁻ en un pozo de abastecimiento de la localidad de Ingeniero Foster, para el período 2005-2017.	163
Figura 93. Ubicación y variación temporal de As y F ⁻ en un pozo de abastecimiento de la localidad de Eduardo Castex, para el período 1996-2017.	164
Figura 94. Ubicación y variación temporal de As y F ⁻ en un pozo de abastecimiento de la localidad de Conhelo, para el período 2002-2017.	165
Figura 95. Ubicación de las muestras con análisis de especiación de Arsénico.	167
Figura 96. Correlación entre el elemento Sr y los cationes Ca y Mg.	169
Figura 97. Correlación entre el V y los elementos As y F.....	170
Figura 98. Correlación entre el HCO ₃ y los elementos F y As.	170
Figura 99. Correlación entre los elementos F y As.....	170
Figura 100. Diagrama de la distribución porcentuales de los tipos químicos de las muestras de agua subterránea en la totalidad del área.	172
Figura 101. Clasificación hidroquímica del agua subterránea: diagrama de Piper.....	173
Figura 102. Clasificación hidroquímica del agua subterránea de la región R1: diagrama de Schoeller-Berkaloff.	174
Figura 103. Clasificación hidroquímica del agua subterránea de la región R2: diagrama de Schoeller-Berkaloff.	175
Figura 104. Clasificación hidroquímica de las muestras de agua subterráneas: diagramas de Stiff.	176
Figura 105. Relación entre los iones Na ⁺ y Cl ⁻ en las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.....	178
Figura 106. Relación entre los iones Ca ²⁺ y SO ₄ ²⁻ en muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.....	179

Figura 107. Relación $r(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/r(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.....	179
Figura 108. Relaciones $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ y $r\text{Mg}/(\text{Ca}+\text{Mg})$ de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.....	180
Figura 109. Diferencia entre cationes y aniones principales en las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.....	181
Figura 110. Diagrama de Estabilidad del agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo, con distintas fases minerales en relación con la actividad del ion sodio.	183
Figura 111. Diagrama de Estabilidad del agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo, con distintas fases minerales en relación con la actividad del ion calcio.	184
Figura 112. Diagrama de Estabilidad del agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo, con distintas fases minerales en relación con la actividad del ion potasio.	185
Figura 113. Fuerza iónica en relación a los SDT para las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.....	186
Figura 114. Presión parcial de CO_2 (en log) en relación al pH de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.....	187
Figura 115. Índice de Saturación de calcita en relación a los SDT de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.....	188
Figura 116. Índice de Saturación de dolomita en relación a los SDT de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.....	188
Figura 117. Índice de Saturación de yeso en relación a los SDT de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.....	189
Figura 118. Recta meteórica global (Craig, 1961).....	192
Figura 119. Ubicación de las estaciones colectoras de precipitación para isótopos en la Provincia de La Pampa.	194
Figura 120. $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ recta meteórica global y recta meteórica regional para el NE de La Pampa y precipitaciones mensuales de las estaciones de Quemú Quemú e Intendente Alvear. Extraído de Ceballo (2020).....	195
Figura 121. Cantidad de precipitación (mm) vs $\delta^{18}\text{O}$ (‰) de la Estación Santa Rosa.....	196
Figura 122. Cantidad de precipitación (mm) vs $\delta^{18}\text{O}$ (‰) de la Estación Arata.	197
Figura 123. Relación $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, recta meteórica global, recta meteórica local, y promedios anuales ponderados de la Estación Santa Rosa para el período 2014-2022.	198
Figura 124. Relación $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, recta meteórica global, recta meteórica local, y promedios anuales ponderados de la Estación Arata para el período 2018-2022.	199
Figura 125. Recta Meteórica Regional realizada para el área de estudio, con las rectas de las estaciones de Arata y Santa Rosa y la recta meteórica global.	200

Figura 126. Recta Meteórica Regional realizada para el área de estudio y la recta meteórica global de referencia.	200
Figura 127. Ubicación de las muestras extraídas de agua subterránea para la determinación de su composición isotópica.	201
Figura 128. $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua subterránea del área de estudio, por región junto a la recta meteórica global, la recta meteórica regional y el valor promedio ponderado de las lluvias de ambas estaciones para el periodo 2014 - 2022.	203
Figura 129. Contenido de Cl^- (mg/L) en relación a la composición de $\delta^{18}\text{O}$, de las muestras de agua subterránea, según distintos procesos identificados. ...	205
Figura 130. Resumen textural de las muestras de sedimentos seleccionadas para el desarrollo de los PES.	209
Figura 131. Resumen del contenido de CO_3^{2-} en las muestras de sedimentos seleccionadas para los PES.	210
Figura 132. Porcentajes de As en cada paso de extracción secuencial.	211
Figura 133. Porcentaje de muestras excedidas por región.	216
Figura 134. Porcentajes de las muestras categorizadas dentro de la clasificación de Bavera (2001).	218
Figura 135. Porcentajes de las muestras categorizadas para riego según U.S. Salinity Laboratory Staff (1954).	220
Figura 136. Ubicación de los perfiles correspondientes a los Modelos Hidrogeológicos Conceptuales de cada región.	223
Figura 137. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Región Hídrica de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1) del área de estudio. *Los valores de profundidad de las perforaciones, del basamento y de las formaciones estratigráficas son esquemáticas.	226
Figura 138. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central (R2) del área de estudio. *Los valores de profundidad de las perforaciones, del basamento y de las formaciones estratigráficas son esquemáticas.	227

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción y detalle de los pasos realizados durante el PES de As aplicado.	29
Tabla 2. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP) según método de Thornthwaite y Mather (1955).	49
Tabla 3. Balance Hídrico de Thornthwaite y Mather (1955) para la localidad de Arata para el período 1998-2018.	53
Tabla 4. Cantidad de lagunas y su extensión areal en una época húmeda (2001) y otra seca (2009) de las dos regiones hídricas que involucran el área de estudio. Extraído de UNLPam (2015).	92
Tabla 5: Ubicación de los SEVs realizados en el área de estudio.	108

Tabla 6. Corte Geológico del SEV 1 (Arata).....	110
Tabla 7. Corte Geológico del SEV 2 (Escuela Los Hornos).	111
Tabla 8. Corte Geológico del SEV 3 (Caleufú).	112
Tabla 9. Corte Geológico del SEV 4 (entre Caleufú y Pichi Huinca).	114
Tabla 10. Corte Geológico del SEV 5 (Pichi Huinca).	115
Tabla 11. Corte Geológico del SEV 6 (La Maruja).	117
Tabla 12. Corte Geológico del SEV 7 (Ingeniero Foster).	118
Tabla 13. Resumen estadístico para la profundidad del nivel freático (m) en R1 y R2.....	125
Tabla 14. Distribución de pozos en las distintas regiones según la profundidad del nivel freático. Siendo “somero” aquellos <35 m, y “profundos” aquellos >35 m.	126
Tabla 15. Tasa de recesión calculada para tres períodos con precipitaciones nulas o menores a 6 mm.	138
Tabla 16. Resumen de los parámetros utilizados para el cálculo de la recarga con el Balance del ion Cl en la localidad de Arata.....	140
Tabla 17. Resumen estadístico de algunos parámetros fisicoquímicos de las precipitaciones de la localidad de Arata.	142
Tabla 18. Resumen estadístico de los componentes fisicoquímicos de las muestras extraídas en el acuífero de interés.....	145
Tabla 19. Resumen y comparación estadística de los principales parámetros fisicoquímicos de las muestras correspondientes a las R1 y R2.....	146
Tabla 20. Resumen estadístico de los elementos traza de las muestras extraídas en el acuífero de interés.	154
Tabla 21. Resumen estadístico de los valores de arsénico y fluoruro en la totalidad del área de estudio y por región.	156
Tabla 22. Promedio y rango de As^{5+} y As Total para un n de 18 muestras. Valores en $\mu g/L$	168
Tabla 23. Concentración promedia, mínima y máxima de As^{5+} en cada región hídrica. Valores en $\mu g/L$	168
Tabla 24. Distribución porcentual de los tipos químicos en cada una las regiones de interés.....	172
Tabla 25. Estaciones colectoras de precipitación de la Provincia de La Pampa.	193
Tabla 26. Promedios ponderados de los registros de $\delta^{18}O$ y δ^2H de la precipitación mensual de la Estación Santa Rosa.....	197
Tabla 27. Promedios ponderados de los registros de $\delta^{18}O$ y δ^2H de la precipitación mensual de la Estación Arata.....	198
Tabla 28. Composición isotópica ($\delta^{18}O$ ‰, δ^2H ‰ y d ‰) de las muestras de agua subterránea del área de estudio.....	201
Tabla 29. Características, litológicas, texturales y mineralógicas de las muestras de sedimentos seleccionadas para el desarrollo de los PES.	209
Tabla 30. Resultados de arsénico en $\mu g/L$ extraído en cada paso de los PES:	211

Tabla 31. Parámetros de calidad de agua para consumo humano del CAA y la OMS.	215
Tabla 32. Criterios de calidad de agua para ganado bovino. TSD es el total de sólidos disueltos (valores en mg/l).	217
Tabla 33. Clasificación para el peligro de salinización del agua para riego según U.S. Salinity Laboratory Staff (1954).	218
Tabla 34. Clasificación para el peligro de sodificación del agua para riego según U.S. Salinity Laboratory Staff (1954).	219

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Estación hidrometeorológica de la localidad de Arata.	15
Foto 2. Estación meteorológica automática David Vintage Pro.	15
Foto 3. Instalación de pluviómetro tipo B del SMN en la localidad de Arata. ...	15
Foto 4. Perforación realizada en el predio de la estación hidrometeorológica de Arata.	16
Foto 5. Extracción de muestras de sedimentos de distintas profundidades durante la perforación de exploración.	18
Foto 6. Medición de nivel estático durante las campañas de campo realizadas en noviembre de 2019.	19
Foto 7. Limnógrafo instalado en la perforación de estudio de la estación hidrometeorológica de la localidad de Arata.	20
Foto 8. Colectores de agua de lluvia instalados en la estación hidrometeorológica de la localidad de Arata.	21
Foto 9. Determinación de cloruro con Espectrofotómetro UV visible Hach dr/4000.	22
Foto 10. Determinación de pH y conductividad eléctrica con sonda multiparamétrica Hanna HI 9828.	22
Foto 11. Extracción de muestras (arriba) y medición <i>in situ</i> de parámetros físicoquímicos (abajo).	23
Foto 12. Campaña de sondeos eléctricos verticales (SEV).	27
Foto 13. Muestras de sedimentos pasadas por mortero (izquierda) y tamizadas (derecha).	27
Foto 14. Agitación de las muestras con agitador orbital DLAB.	28
Foto 15. Muestras dentro de la ultracentrífuga (izquierda) y muestras ya centrifugadas (derecha).	29
Foto 16. Extracción del sobrenadante con jeringa (izquierda) y filtrado con filtros descartables de PVDF de 0,45 μm (derecha).	29
Foto 17. Planicie ondulada de la unidad de las acumulaciones arenosas combinadas con mesetas residuales.	89
Foto 18. Médanos fijados con vegetación en la unidad de las acumulaciones arenosas combinadas con mesetas residuales.	90

Foto 19. Meseta residual con tosca en la unidad de las acumulaciones arenosas combinadas con mesetas residuales.....	90
Foto 20. Afloramiento de tosca en la unidad de la planicie con tosca.....	91
Foto 21. Tosca en superficie en la unidad de la planicie con tosca.....	91
Foto 22. Laguna de Chadilauquen, zona de descarga del Sistema hídrico de Embajador Martini, dentro de la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central.....	99
Foto 23. Planta de ósmosis inversa y servicio de agua potable para la comunidad brindado por la COSEPAR (Cooperativa de Servicios Públicos de Arata), en la localidad de Arata.	213

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El agua es un recurso esencial para el desarrollo de la vida, y a efectos de las actividades humanas, debe considerarse como parte fundamental del ecosistema. Como recurso, el ser humano lo utiliza para satisfacer necesidades de desarrollo, ya sea para consumo o para llevar adelante actividades productivas destinadas al progreso económico de la sociedad.

Por lo tanto, el agua debe ser inventariada en términos de cantidad y calidad en función al uso que se le destine. La calidad del agua es resultado de dos mecanismos principales: las acciones antrópicas, por un lado, y la dinámica propia del ciclo hidrológico y sus interacciones en el espacio y en el tiempo por el otro. Por lo tanto, durante su gestión, puede ser considerada como una variable aleatoria dependiente de ambos mecanismos (Schulz *et al.*, 2005).

El planeta está conformado, en su mayoría, con agua salada presente en océanos, mientras que sólo el 0,68% es agua dulce subterránea y el 0,01% es superficial (Escuder *et al.*, 2009). Para lograr satisfacer necesidades, la sociedad genera extracciones del recurso en calidad y cantidad suficiente desde las dos fuentes de menor proporción de agua dulce, aunque existen extensiones de territorios en las cuales las fuentes de agua superficial no son abundantes, por lo que la principal fuente de abastecimiento para distintos usos es el agua subterránea.

En Argentina, se estima que el 75% del territorio es árido o semiárido lo cual provoca que exista un marcado déficit en el balance hídrico. Es así que el agua subterránea es clave para abastecer las demandas hídricas de la población que carece de otras fuentes de agua.

La provincia de La Pampa presenta una fuerte dependencia por el recurso subterráneo, al igual que gran parte de la provincia de Córdoba y el sector oeste de la provincia de Buenos Aires, por lo que se convierte en un recurso primordial para el sustento y desarrollo de dichas áreas. El agua subterránea es el resultado de la infiltración de, generalmente, agua meteórica, a través de una formación geológica con características físicas favorables para su circulación y almacenamiento, tales como la porosidad y permeabilidad (Davis y De Wiest, 1971; Appelo y Postma, 1993). La escasez de recursos superficiales condujo a la provincia de La Pampa a la explotación de agua subterránea desde la década del '70, llevando a cabo obras de construcción de abastecimiento de agua potable para sus ciudades más grandes, tales como Santa Rosa y General Pico (Schulz *et al.*, 2005).

Las extensas áreas de llanura que presentan las provincias mencionadas ven disminuidas las posibilidades de obtener agua apta para consumo humano por presentar elevados contenidos principalmente de arsénico, fluoruro, nitrato, boro, molibdeno, vanadio, entre otros, en sus aguas subterráneas, que superan los límites admisibles para consumo humano, imposibilitando su uso para tal fin.

El arsénico (As) es un oligoelemento con potenciales carcinógenos presente en estas fuentes de agua natural como resultado de actividades humanas o por características litológicas propias del medio de donde se encuentra. Según Paige *et al.* (2006), globalmente, los procesos naturales contribuyen aproximadamente en un total de 40.000 toneladas anuales de arsénico en el ambiente, mientras que las actividades humanas duplican estas cantidades. En Argentina, la región afectada por arsénico de origen natural es una de las más extensas del mundo y comprende parte de las provincias de Córdoba, La Pampa, Santiago del Estero, San Luis, Santa Fe, Buenos Aires, Chaco, Formosa, Salta, Jujuy, Tucumán, La Rioja, San Juan y Mendoza.

Los acuíferos con contenidos elevados de arsénico en esta extensa región del país están formados por una secuencia sedimentaria con predominio de loess de edad cuaternaria. Parte del arsénico en las aguas puede derivar de la disolución de vidrio volcánico como consecuencia de la actividad volcánica de la Cordillera de Los Andes (INTI, 2009). De forma natural, el arsénico en estas fuentes de agua existe predominantemente de forma inorgánica, principalmente como arsenito (As^{3+}) y arseniato (As^{5+}), pudiendo raramente ser encontrado en formas orgánicas. Al momento de evaluar su toxicidad, el arsenito es más tóxico que el arseniato, y a su vez, las formas inorgánicas son más perjudiciales que los derivados orgánicos (Thirunavukkarasu *et al.*, 2001).

La ingestión de fuentes de agua con contenidos elevados de arsénico puede causar efectos perjudiciales en la salud humana incluyendo desde lesiones de la piel hasta formación de cáncer, documentado en diversos trabajos internacionales (Smith *et al.*, 1998; Castro de Esparza, 2009; Bundschuh *et al.*, 2009).

Este oligoelemento presenta un comportamiento anárquico al momento de determinar su presencia, distribución, movilidad y evolución tanto horizontal como vertical, demostrando su grado de complejidad durante su estudio. No obstante existen dos factores condicionantes que ponen en manifiesto la presencia o no de este elemento, repercutiendo también en la presencia de otros como el selenio, uranio y vanadio (Nicolli *et al.*, 1997): 1) el espacio, el cual se analiza a partir de tres aspectos fundamentales que son a) factores climáticos, b) factores geológicos (estructurales y litológicos) y c) factores geomorfológicos; y 2) el tiempo, dependiente del primer factor mencionado, fundamentalmente de las precipitaciones (Schulz *et al.*, 2002). La movilidad del

arsénico entre el sedimento y el agua se encuentra fuertemente controlado por el pH y las condiciones redox, mientras que los procesos geoquímicos que intervienen en la movilización del arsénico son de adsorción-desorción, y puede ser adsorbido por óxidos de hierro, manganeso y aluminio principalmente (INTI, 2009).

La composición del agua subterránea manifiesta las características de la dinámica temporal y espacial de los fenómenos físicos, químicos y biológicos con el medio por el cual circula, dando lugar a la hidrogeoquímica. La interacción del agua subterránea y el sustrato en el cual se aloja permite que adquiera características químicas propias, que a su vez dependen del tiempo de residencia y de contacto (Manzano *et al.*, 2003).

El área seleccionada para el estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico realizado forma parte regionalmente de la gran Llanura Chacopampeana (Russo *et al.*, 1979) en un sector noreste de la provincia de La Pampa, que abarca principalmente los departamentos de Conhelo, Trenel y Rancul. Este sector de bajas pendientes carece de una red de drenaje definida por lo que predomina la infiltración del agua al acuífero, manteniendo un largo tiempo de contacto con la formación.

En este tipo de ambientes, como es típico en las llanuras, predominan los movimientos verticales del agua (evapotranspiración – infiltración) sobre los horizontales (escurrimientos), existiendo una fuerte interrelación entre el agua superficial y el agua subterránea (Kruse y Zimmermann, 2002).

El principal almacén hidrogeológico es la Formación Cerro Azul (Linares *et al.*, 1980) la cual es una secuencia sedimentaria de arenas muy finas y limos, que a su vez contiene material de origen volcánico proveniente de erupciones Andinas. La disolución del vidrio volcánico proveniente de esta formación es una de las principales causas por las que se encuentran concentraciones elevadas de arsénico en los acuíferos de la provincia de La Pampa, y los nódulos de óxidos de los distintos metales presentes en dicha formación son factores fundamentales en la movilidad del oligoelemento.

1.2 Fundamentos de la elección del tema

La dinámica del agua subterránea es compleja y aparece ligada a la distribución espacial de la recarga y a los diferentes estratos litológicos que atraviesa. Las propiedades de estos últimos sumado a las características hidrodinámicas dan lugar a especies hidroquímicas particulares y a variaciones en el contenido de oligoelementos, tales como fluoruro y arsénico. Las concentraciones de estos elementos condicionan enormemente las zonas de explotación para los distintos usos, principalmente en lo que respecta al consumo humano.

Uno de los acuíferos de mayor importancia por su gran extensión en la Argentina es el denominado *Acuífero Pampeano*, que involucra a varias provincias, entre ellas, a la provincia de La Pampa, incluyendo el área de estudio seleccionada. Teniendo en cuenta que gran parte del país depende exclusivamente del agua subterránea por no contar de otras fuentes, el acuífero mencionado contribuye en aproximadamente un 60% del Producto Bruto Nacional, ya que provee de agua potable a importantes ciudades, abastece a más de 55 millones de cabezas de ganado y posibilita actividades agrícolas bajo riego (Schulz y Castro, 2003).

La formación geológica que almacena este acuífero, denominada Formación Cerro Azul, se encuentra conformada por una secuencia sedimentaria loésica del cuaternario, que debido a su alto contenido de vidrio volcánico y su disolución, ha conformado a este acuífero de elevadas concentraciones de arsénico (INTI, 2009).

En Argentina, la problemática relacionada al arsénico en el agua de consumo comenzó a tener relevancia cuando epidemiólogos de Córdoba y otras provincias evidenciaron la enfermedad denominada Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE) en la zona, producida por el consumo de arsénico a través del agua de bebida proveniente de los acuíferos explotados para abastecimiento (Schulz *et al.*, 2005) e incluso proveniente de los alimentos (Bundschuh *et al.*, 2012).

El arsénico presenta un comportamiento anárquico de gran complejidad, difícil de predecir. La movilidad y distribución de este oligoelemento y de la composición química general del agua subterránea depende principalmente de la dinámica temporal y espacial de los fenómenos físicos, químicos y biológicos con el medio por el cual circula. La interacción del agua subterránea y los minerales de la fase sólida por la cual circula permite que adquiera una determinada marca litológica a partir de procesos de hidrólisis, disolución, intercambio iónico, entre otros, que también dependen del tiempo de contacto (Manzano *et al.*, 2003).

La correcta planificación y gestión de estos acuíferos requiere contar con una variada información básica, entre la cual la caracterización hidrogeológica, hidrogeoquímica y el estudio detallado del comportamiento del arsénico constituyen un aspecto técnico relevante y de utilidad para la toma de decisiones correctas tendientes al uso racional del recurso hídrico subterráneo, tanto para abastecimiento humano, agropecuario, industrial, u otros.

1.3 Fundamentos de la elección del área de trabajo

La provincia de La Pampa, dado a la escasez de recursos superficiales, abastece a su población a partir de la explotación del recurso hídrico

subterráneo desde los años '70, efectuando construcciones de obras de abastecimiento de agua potable. Según lo informado por la Dirección de Estadísticas y Censos de La Pampa en el año 2022, la provincia presenta una población total de 366.022 habitantes, de los cuales Santa Rosa tiene 120.000 y General Pico 68.000. La explotación del recurso hídrico actualmente se encuentra fuertemente limitado por las elevadas concentraciones de arsénico y fluoruro, siendo el sector noreste el más expuesto, abarcando las localidades mencionadas, y medio centenar de asentamientos más. En los casos en que las poblaciones no tienen la posibilidad de contar con agua de buena calidad para consumo humano, deben disponer de plantas de tratamiento por sistema de ósmosis inversa, siendo el caso de gran parte de las localidades del área de estudio.

En la zona de estudio, las concentraciones de arsénico encontradas en la mayoría de las perforaciones realizadas para abastecimiento de agua para consumo humano, superan notablemente el valor mínimo permitido de 0,01 ppm por la OMS (2011) y el rango admitido por el Código Alimentario Argentino (CAA, 2021) de 0,01 a 0,05 ppm (este último valor definido hasta contar con los resultados del estudio “Hidroarsenicismo y Saneamiento Básico en la República Argentina”). Algunas de las localidades de la zona, que tienen provisión de agua a través de una red de distribución, cuentan con una planta de remoción de arsénico para lograr disminuir los tenores del oligoelemento.

El sector noreste de la provincia se caracteriza por presentar una alta variabilidad en la calidad del agua, como también en su distribución espacial y en las concentraciones de arsénico. Esta dispersión tan acusada se encuentra ligada a la compleja formación de los sedimentos que constituyen el *Acuífero Pampeano*, caracterizado por su alto contenido de dicho elemento. En zonas de llanura el agua de precipitación infiltra hacia el acuífero, y su bajo gradiente hidráulico favorece el tiempo de contacto entre el agua y los sedimentos que conforman la formación hidrogeológica, lo que genera la presencia de una mayor cantidad de iones disueltos, entre ellos el arsénico.

Por otro lado, a medida que la demanda poblacional aumenta en el transcurso del tiempo, exige una mayor explotación del acuífero. Esto se traduce en un aumento del caudal de explotación, susceptible de generar cambios en la composición iónica del agua, como puede ser el aumento en el contenido de arsénico. Ante esta situación, las localidades tienden a aumentar el número de perforaciones por lo que es de suma importancia reconocer los sitios de extracción preferencial para lograr una correcta gestión del acuífero.

El área seleccionada cuenta con estudios previos tanto hidrológicos como hidroquímicos regionales y locales, que conjuntamente con la información que se obtuvo durante la realización de esta tesis, se pretende conocer la

hidrología, hidrodinámica y su relación con el comportamiento del arsénico que permitan tener un conocimiento y conceptualización hidrogeológica detallada.

1.4 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el sector nororiental de la provincia de La Pampa, que abarca el sur del departamento Rancul, parte del sector norte del departamento Conhelo y una pequeña parte al suroeste del departamento Trenel (Figura 1). Hacia el oeste, el área de estudio se extiende hasta el límite provincial de San Luis, mientras que al este limita con la Ruta Nacional N° 35. Se localiza entre los meridianos 64°16' y 65°06'O y los paralelos 35°33' y 36°3' S, comprendiendo un área de aproximadamente 4.100 km² dentro la Hoja Geológica Rancul 3566-IV del Servicio Geológico Minero Argentino que se encuentra actualmente en ejecución.

Según el Inventario Integrado de Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa (Cano *et al.*, 1980), la zona de estudio abarca hacia el este una fracción de la Región Oriental, específicamente de la "Subregión de las planicies con tosca". Su relieve se manifiesta como una planicie uniforme muy suavemente ondulada compuesta por pequeñas lomas y depresiones. Está caracterizada por la presencia de una costra calcárea continua con espesores entre 0,4 y 2 m de espesor denominada tosca. Con posterioridad se depositó un manto arenoso delgado de origen eólico. Hacia el oeste comprende una parte de la Región Central, específicamente de la "Subregión de acumulaciones arenosas combinadas con mesetas residuales", cuyo relieve también se distingue por planicies con geoformas características de acumulación de arenas.

Con respecto a las Cuencas y Regiones Hídricas de la provincia de La Pampa (Giraut *et al.*, 2006), el área de estudio comprende en parte a la "Región de la planicie pampeana central" al oeste y la "Región de la planicie longitudinal con bajos medanosos" al este, abreviadas en el resto del texto y figuras como R1 y R2 respectivamente. La ubicación coincide aproximadamente con las regiones anteriormente mencionadas. Debido a la inexistencia de drenajes superficiales, sólo se observan algunas depresiones geomorfológicas que forman reservorios circunstanciales condicionados por las lluvias, los cuales comienzan a secarse como consecuencia de la evaporación en verano.

En la primera región mencionada (R1) las aguas subterráneas se encuentran a una profundidad media de 10 m y la salinidad varía según la profundidad. Mientras que, en la segunda región (R2), los niveles freáticos se hallan en general más profundos. La calidad del recurso es variada y es apta para ganadería y variable para consumo humano, siendo el arsénico uno de los oligoelementos nocivos detectado en elevadas concentraciones junto al fluoruro.

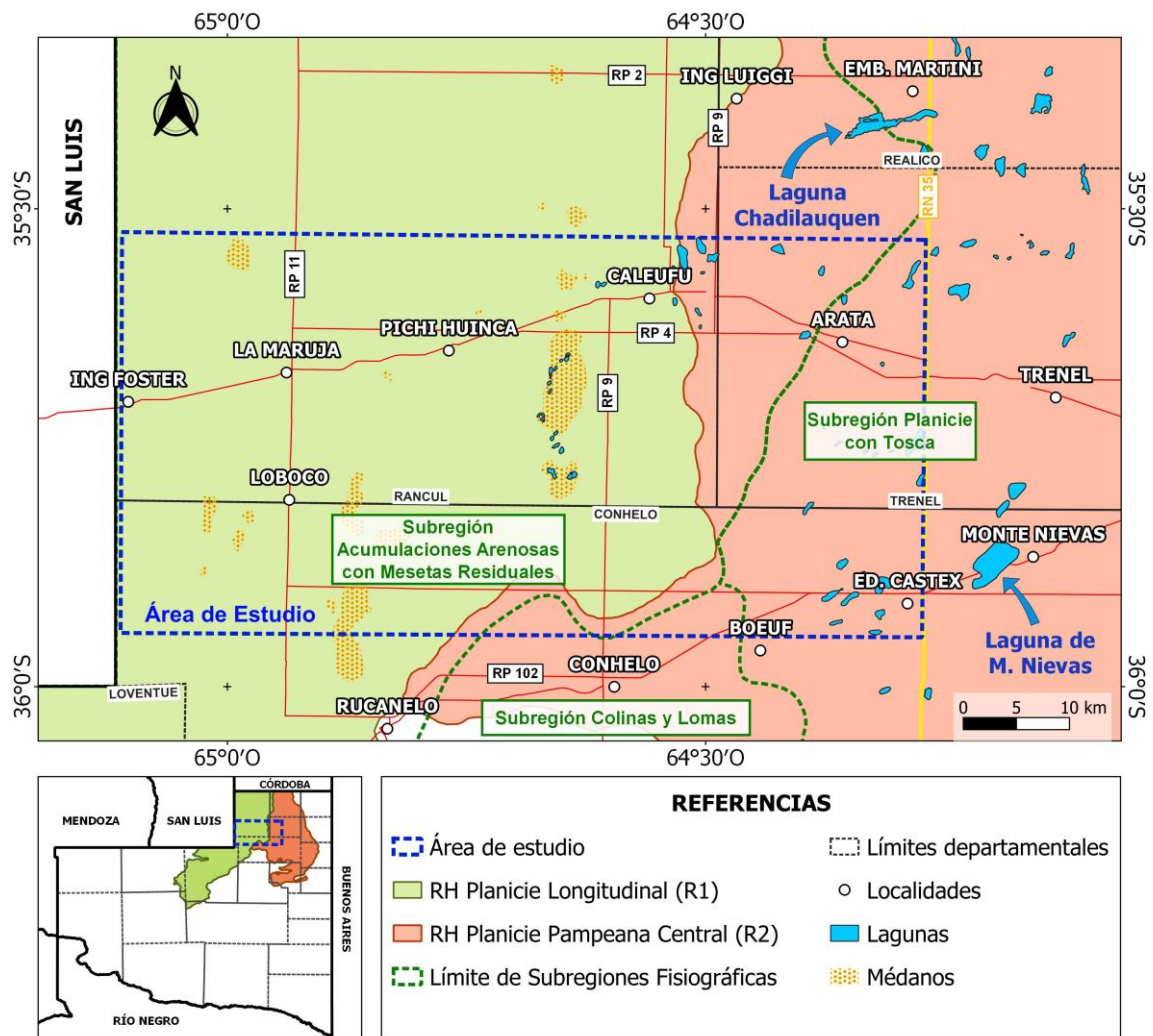


Figura 1. Ubicación del área de estudio. RH: Región Hídrica.

Calmels (1996), por otro lado, la ubica dentro de la unidad geomorfológica "De la llanura pampeana de modelado eólico superimpuesto". Esta se caracteriza por presentar un manto de arena en la superficie de espesor variable pero ininterrumpido de entre 0,4 a 15 m resultado de la acción morfogenética del viento. Las geoformas suaves en la llanura cumplen un rol determinante en el destino del agua de lluvia. Debido a la inexistencia de pendientes pronunciadas que dificultan el flujo superficial, no existe una red de drenaje desarrollada e integrada.

En general, las características topográficas llanas o de bajas pendientes imposibilitan el desarrollo de una red de drenaje definida, por lo que la mayor parte del agua de precipitación infiltra hacia los sistemas acuíferos, manteniendo un largo tiempo de contacto con las formaciones geológicas por las que circula.

El área se ubica entre las isohietas de 500 y 700 mm y está caracterizada como región semiárida según el índice hídrico de Thornthwaite (Roberto *et al.*,

1994; Calmels, 1996). Según los datos de precipitación del período 1921-2011 de la Administración Provincial del Agua (2015), la media obtenida considerando todas las localidades del área de estudio es de 659,7 mm/año. Caleufú es la localidad que registra mayor precipitación (703 mm/año), mientras que la menor registrada es en la localidad de Ingeniero Foster (598,4 mm/año). Las temperaturas medias varían entre los 10°C en julio y 24°C en enero.

Geológicamente, en la localidad de Eduardo Castex, Giaí *et al.* (2002) reconocieron tres unidades estratigráficas. El basamento geológico a 180 m de profundidad compuesto por rocas graníticas. Por encima se encuentra la Formación Cerro Azul (Linares *et al.*, 1980; Visconti, 2007) asignada al Mioceno superior (Goin *et al.*, 2000), considerada como el principal reservorio hidrogeológico de esta región, compuesto por depósitos loésicos de origen eólico y retrabajados que conforman una secuencia sedimentaria integrada por arenas muy finas y limosas en la parte superior, mientras que en profundidad está conformada preferentemente por limos hasta limos-arcillosos. Por otro lado, tiene un importante contenido de material de origen volcánico (cenizas dacíticas a riolíticas, vidrio volcánico y pumicita) proveniente de erupciones Andinas. Estos sedimentos se encuentran diagenéticamente alterados, propios de climas semiáridos, presentando nódulos y cementación de tipo calcárea y ocasionalmente de óxidos de manganeso, hierro y aluminio que forman moteados (Smedley *et al.*, 2000). La disolución del vidrio volcánico proveniente de esta formación es uno de las principales consecuencias que da origen a los acuíferos arseníferos en la provincia de La Pampa, y los nódulos de óxidos de los distintos metales presentes en dicha formación son factores fundamentales en la movilidad del oligoelemento.

La superficie freática posee una leve inclinación hacia el este - noreste, con gradientes hidráulicos típicamente de 0,003 y líneas piezométricas aproximadamente paralelas. Los niveles freáticos históricamente se encuentran entre 5 y 10 m de profundidad. Los acuíferos someros están compuestos principalmente por loess terciario. El agua subterránea de la región presenta un amplio rango en su composición química, predominando la baja salinidad pero con incrementos considerables de fluoruro y arsénico en niveles superiores a los 25 m de profundidad (Smedley *et al.*, 2002; Schulz *et al.*, 2005).

Si bien la dirección del flujo subterráneo regional es de oeste a este siguiendo el gradiente topográfico, la configuración geomorfológica determina sectores de recarga de los acuíferos en las formas elevadas del relieve, en tanto que las depresiones o bajos constituyen las zonas de descarga. Las áreas de conducción se ubican entre los dos anteriores con pendientes predominantemente llanas (Schulz *et al.*, 2005). Esta disposición del relieve permite el desarrollo de una evolución geoquímica local, que a su vez influye

no sólo en la salinidad sino también en las concentraciones de arsénico encontradas, siendo particularmente mayores en los acuíferos ubicados en las inmediaciones de las zonas más deprimidas que actúan como zonas de descarga.

1.5 Objetivos

El conocimiento detallado del sistema acuífero, de su climatología, su litología, sedimentología, hidrodinámica e hidrogeoquímica permitirá lograr el siguiente **objetivo general**: realizar un modelo conceptual hidrogeológico e hidrogeoquímico que permita evaluar el funcionamiento del acuífero freático en sentido del flujo subterráneo y reconocer el comportamiento espacial del arsénico en relación a las fases portadoras.

Teniendo en cuenta la problemática de la zona noreste de la provincia de La Pampa, y con el fin de cumplir el objetivo general anteriormente mencionado, se presentan los siguientes **objetivos específicos**:

- Caracterizar la hidrogeología regional y particular del área de estudio.
- Determinar a partir de prospección geofísica las características del basamento geológico como base impermeable del Acuífero Pampeano.
- Realizar una evaluación de las particularidades hidrodinámicas y su relación con la profundización del basamento.
- Estimar valores de recarga del acuífero con diferentes metodologías.
- Determinar los principales tipos de facies hidroquímicas que predominan en el agua subterránea.
- Conocer los principales oligoelementos que predominan, y determinar la distribución de las especies del arsénico.
- Distinguir procesos hidrológicos en el sistema a partir de la composición isotópica.
- Reconocer los principales procesos hidrogeoquímicos en el agua subterránea del el área de estudio a partir de la aplicación de relaciones iónicas, diagramas de estabilidad e índices de saturación.
- Contribuir al conocimiento distribución temporal y espacial del arsénico.
- Determinar las principales fases portadoras de arsénico de los sedimentos del área, a partir de procedimientos de extracción secuencial (PES).
- Reconocer la aptitud del agua para distintos usos (consumo humano, ganadero y riego).

1.6 Hipótesis

Las hipótesis de trabajo que orientan esta investigación parten de los supuestos que han orientado la formulación de los objetivos.

Hipótesis 1: La litología y los procesos hidrogeoquímicos son los principales responsables de la composición química del agua subterránea.

Hipótesis 2: El contenido de arsénico en el agua subterránea del área de estudio está condicionado por el espacio (geología y geomorfología), y al tiempo de contacto entre agua-sedimento.

La concreción de los objetivos planteados permitió adquirir una base conceptual útil para la prospección de sectores acuíferos de calidad adecuada para su aprovechamiento para consumo humano y agropecuario principalmente. Los resultados obtenidos resultaron de gran utilidad en la planificación y gestión de los servicios de provisión de agua potable de las localidades ubicadas en el área de estudio.

1.7 Antecedentes y estado del arte

El noreste de la provincia de La Pampa cuenta con bibliografía previa de estudios hidrológicos, hidrolitológicos, hidrogeoquímicos, geológicos, geomorfológicos en marcos tanto regionales, como también locales, que conjuntamente con la información que se obtuvo a partir de esta investigación permitieron alcanzar los objetivos planteados sobre la zona específica seleccionada.

Al momento de ejecutar obras de captación de agua subterránea para abastecer a las localidades de la zona, la provincia, a través de la Administración Provincial del Agua, desarrolla investigaciones y estudios previos a la ejecución de perforaciones en cada localidad para determinar las mejores zonas de explotación. Algunos no presentan rigurosidad científica pero son los primeros estudios fuentes de la zona que sirven de base para llevar a cabo este estudio. Algunos de los trabajos son: De Ormaechea (1972), Ruíz (1975), Sisul (1976), Malán y Miglianelli (1979), Bisceglia (1980), Miglianelli (1980), Malán (1981), Miglianelli (1983) y Castro y Schulz (2009).

A nivel regional existen estudios relacionados al arsénico, respecto a la contaminación de aguas subterráneas con dicho elemento, al movimiento, distribución e hidrogeoquímica del mismo, entre los cuales podemos citar a: Nicolli *et al.* (1989 y 1997), Smedley *et al.* (2000; 2002 y 2005), Pearce (2000), Keon *et al.* (2001), Bundschuh *et al.* (2008a y 2008b), Cabrera *et al.* (2005), Bhattacharya *et al.* (2006), Dietrich *et al.* (2016), entre otros. Numerosos estudios describen los aspectos geológicos y geomorfológicos en el área de estudio y el resto de la provincia (Frenguelli, 1955; Teruggi, 1957; Salso, 1966; Arigós, 1969; Irigoyen, 1975; Calmels y Tullio, 1980; Linares *et al.*, 1980; Teruggi y Imbellone, 1983; Ramonell *et al.*, 1993; Calmels, 1996; De Elorriaga, 1996; Visconti *et al.*, 1996; De Elorriaga y Tullio, 1998; Rimoldi y Silva Nieto, 1999; Goin *et al.*, 2000; Zarate, 2003; Calmels y Casadío, 2005).

Respecto a informes sobre la sedimentología y estratigrafía de la zona de estudio, de suma utilidad para estudios hidrogeológicos, pueden citarse los trabajos de la Dirección General de Industria Minera (1949), Visconti (2007), Visconti *et al.* (1996 y 2010).

Los aspectos climatológicos, edafológicos, flora y vegetación se exponen en el “Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa” de Cano *et al.* (1980) y en “Lluvias en la pampa central. Tendencias y variaciones del siglo” de Roberto *et al.* (1994).

El cálculo de la recarga forma parte de la determinación del balance de agua del acuífero, necesario para realizar una modelación conceptual de la fuente de agua en cuestión. El balance de agua en el suelo (Thornthwaite y Mather, 1955) es un método tradicionalmente aplicado en innumerables estudios tanto hidrológicos como agronómicos. Se llevaron a cabo otras técnicas como la del balance del ion cloruro que fue aplicada en Argentina por Varni *et al.* (1996), Malán *et al.* (1993 y 1997), Dornes y Schulz (2001), Varni (2004) y Mariño (2004); el método análisis de fluctuaciones del nivel freático que fue aplicado en Argentina por Mariño y Bonorino (1996), Giai (1997), Malán *et al.* (1997); Laurencena *et al.* (1999 y 2002), Mariño y Dalmaso (2003), Arroyo y Mariño (2006), entre otros.

Las técnicas isotópicas han sido ampliamente aplicadas en varias zonas de los Sistemas Pampeanos (Dapeña y Panarello, 2004; Quiróz *et al.*, 2008; Cabrera *et al.*, 2009; entre muchos otros). Se han instalado varias estaciones colectoras de precipitación para la medición de isótopos estables y tritio en la provincia de La Pampa. A través de las estaciones Padre Buodo y El Escabel se contribuyó con el estudio del origen del agua y los mecanismos de la recarga en el acuífero del Valle Argentino (Schulz, 2004) y en el área de General Pico-Dorila (Dapeña *et al.*, 2002; Mariño *et al.*, 2005). También se instalaron en las localidades de Quemú Quemú e Intendente Alvear para la tesis doctoral de Ceballo (2020).

Por otro lado, algunos de los trabajos dedicados a evaluar la calidad del agua para distintos usos son los de Dalmaso *et al.* (1999 y 2000), Schulz *et al.* (2001), Medus *et al.* (2005) y, Mariño y Schulz (2006). Mariño *et al.* (2005) también realizaron una caracterización hidroquímica del acuífero General Pico-Dorila.

Específicamente para llevar a cabo los ensayos PES (Procedimientos de Extracción Secuencial) de arsénico en esta tesis doctoral, se tuvo en cuenta a modo de referencia estudios de carácter internacional y nacional que utilizaron dicha metodología como Keon *et al.* (2001), Dold (2003) y Bettoschi *et al.* (2018). En Argentina de manera regional se encuentran investigaciones que han utilizado esta metodología para analizar el comportamiento del arsénico en

el Acuífero Pampeano como Cacciabue, *et al.* (2016) y Dietrich *et al.* (2022), como también la aplicación de ensayos batch para analizar el comportamiento de otros elementos como fluoruro realizado por Dalmaso *et al.* (2005).

En los últimos años, se desarrollaron investigaciones puntuales en áreas cercanas a la zona de estudio. Rodríguez (2012) planteó un modelo numérico hidrodinámico a fin de reproducir las direcciones de flujo del agua subterránea, la variación espacial de los niveles saturados y su relación con el flujo del agua superficial en el acuífero de Quemú Quemú. En General Pico, se cuenta con datos de una tesis doctoral de Mariño (2003), en donde su autor propuso un modelo conceptual para explicar la evolución hidroquímica en el acuífero General Pico-Dorila. Asimismo, para la zona de Intendente Alvear existen antecedentes en Castro (2008) quien realizó una caracterización hidrogeológica del acuífero y elaboró un modelo conceptual del sistema. Aullón Alcaine (2013) realizó su tesis doctoral respecto al estudio del movimiento y distribución del arsénico en el noreste de la provincia, en el Acuífero Pampeano involucrando las localidades de Quemú Quemú e Intendente Alvear.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Revisión de antecedentes

Se obtuvo información antecedente regional y específica del área, de la temática hidrogeológica, geomorfológica, geológica, estratigráfica, referida al drenaje superficial, y al uso del agua subterránea proveniente de la Administración Provincial del Agua (APA), Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de La Pampa, o investigadores de la Universidad Nacional de La Pampa. También se caracterizó a las poblaciones que se emplazan en el área y explotan el recurso hídrico subterráneo, identificando cómo es la gestión del servicio de agua potable (cooperativo o municipal) y problemáticas asociadas a su calidad.

Se extrajeron las cartas topográficas escala 1:100.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) desarrolladas en el año 2019 como MDE (Modelo Digital de Elevación), contemplándose un total de 6 cartas detalladas en la Figura 2. Las mismas se utilizaron en formato digital *raster*, para el diseño del mapa base del área de estudio, identificando los sitios de interés (localidades, molinos, piezómetros, entre otros), utilizando el software libre QGIS 3.4.7.

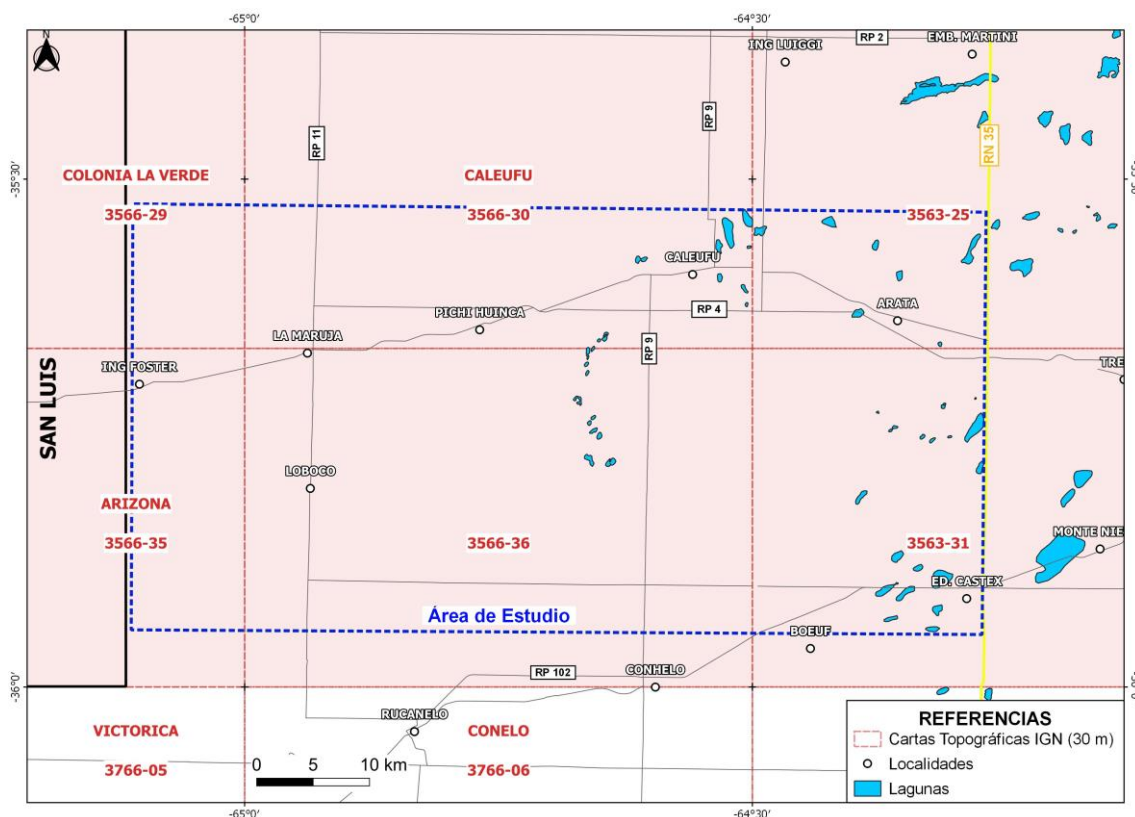


Figura 2. Distribución de cartas topográficas del IGN que abarca el área de estudio, a escala 1:100.000.

Para el detalle de los rasgos geomorfológicos, topográficos y geológicos también se utilizaron las cartas topográficas digitales (o MDE) para la determinación de curvas de nivel, como también se recopiló información respecto a las principales estructuras, las unidades geomorfológicas y de suelos presentes en el área de estudio. Durante las campañas de campo se analizaron los componentes del relieve, características litológicas y afloramientos, identificación de médanos y lagunas, entre otros.

Por otro lado, se contó con perfiles litológicos de perforaciones profundas realizadas durante los años 1934 y 1939 por el Servicio Hidrogeológico de la Dirección de Minas y Geología, Ministerio de Agricultura a partir de los cuales se pudo identificar características y profundidades de las formaciones que componen el área y del basamento cristalino. A partir de toda esta información se logró diseñar el esquema geológico-geomorfológico del área de interés.

2.2 Tratamiento hidrometeorológico

Para la recopilación de datos hidrometeorológicos se contó con los registros pluviométricos colectados en estaciones policiales desde 1921 hasta 2018, en todas las localidades ubicadas en el área de interés (Arata, Caleufú, Pichi Huinca, La Maruja, Ingeniero Foster, Eduardo Castex), y localidades aledañas (Conhelo, Rucanelo, Ingeniero Luiggi). El resto de los datos climatológicos como la temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, entre otras, fueron obtenidos de la Estación Meteorológica “Don Osvaldo” operada por la Administración Provincial del Agua (APA) desde 1998 hasta la actualidad, ubicada a unos 18 km al norte de Arata (35°29'14"S; 64°26'31"O). Estos datos también fueron utilizados para calcular la evapotranspiración a partir de distintos métodos.

Además, con la colaboración de la Cooperativa de Servicios Públicos de Arata (COSEPAR) y la Municipalidad de la localidad de Arata, se instaló un centro de recolección de datos hidrometeorológicos. Para tal fin se construyó un cerco perimetral de 900 m² en un predio de carácter municipal (Foto 1), donde fue ubicada una estación meteorológica automática Davis Vintage Pro (Foto 2) para la obtención de datos climáticos (temperatura, viento, precipitación, humedad relativa, entre otros) por la Subsecretaría de Asuntos Agrarios del Ministerio de la Producción de la provincia de La Pampa, la cual opera desde el año 2018. Sin embargo, estos últimos datos no pudieron ser utilizados dado a que el registro es escaso. En la misma estación también se colocó un pluviómetro tipo B del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Foto 3) registrando datos desde marzo de 2018, cuyos datos fueron utilizados para la aplicación del método de cálculo de recarga del balance de ion cloruro.



Foto 1. Estación hidrometeorológica de la localidad de Arata.



Foto 2. Estación meteorológica automática David Vintage Pro.



Foto 3. Instalación de pluviómetro tipo B del SMN en la localidad de Arata.

Las series hidrometeorológicas seleccionadas fueron tratadas estadísticamente, de manera de conocer la media anual, variabilidad en el tiempo y sus tendencias. Se plantearon los balances hidrológicos modulares (Thornthwaite y Mather, 1955) para dichos registros, de manera de poder estimar la tasa de evapotranspiración real y así definir períodos de déficit y/o excesos hídricos.

2.3 Tratamiento sedimentológico

Con la colaboración de la Administración Provincial del Agua (APA), se llevó a cabo donde se localiza la estación hidrometeorológica de Arata, una perforación de exploración (Foto 4) con sistema rotativo, de 48 metros de profundidad, encamisado con caños de PVC de 5". Los filtros se ubicaron entre los 35,5 a 45,5 metros. Para perforar se utilizó como lodo Revert (polímero orgánico) con el fin de evitar la contaminación de las muestras de suelo.



Foto 4. Perforación realizada en el predio de la estación hidrometeorológica de Arata.

Durante la perforación se obtuvieron muestras de sedimentos cada 2 metros para distintos análisis (Foto 5), para llevar a cabo también el estudio de la interacción agua-sedimento mediante procedimientos de extracción secuencial de arsénico (PES). Las muestras de sedimentos extraídas durante la perforación de exploración fueron sometidas a distintos análisis:

- Descripción litológica (cutting) a partir de lupa microscópica, realizadas en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Análisis texturales por detector óptico de partículas, determinación de porcentajes de arcilla, limos y arenas, realizados por el Laboratorio de Suelos de INCITAP-CONICET, de la Universidad Nacional de La Pampa.
- Difractometría de rayos X para la determinación de especies cristalinas, utilizando un difractómetro Rigaku D Max III C con radiación de Cu K α y monocromador de grafito. Se trabajó sobre muestras de polvo a 35 Kv y 15 mA, realizado en la Universidad Nacional del Sur.
- Determinación de pH en las muestras de suelo: se pesan 20 g de suelo seco al aire y tamizado por malla de 2000 μ c, se agregan a un vaso de precipitado y se incorporan 50 ml de agua destilada hervida. Se agita intermitentemente durante 30 minutos y se determina el pH introduciendo en la suspensión un pHmetro OAKTON, modelo PCSTestr 3. Realizado por el Laboratorio de Suelos de INCITAP-CONICET de la Universidad Nacional de La Pampa.
- Determinación de conductividad eléctrica: se pesan 20 g de suelo/sedimento, se introducen en un recipiente y se agregan 100 ml de agua destilada. Se agita durante 15 minutos y se deja en reposo al menos durante 1 h. Antes de filtrar se agita con la mano varias veces. Se filtra con embudo y sobre el filtrado se determina la conductividad eléctrica. El dato se logra con el conductímetro Oakton, modelo PCSTestr 35. Realizado por el Laboratorio de Suelos de INCITAP-CONICET de la Universidad Nacional de La Pampa.
- Determinación de carbonatos (CO $_3^{2-}$): se realiza con un calcímetro digital Netto. El calcímetro mide la cantidad de anhídrido carbónico (CO $_2$) liberado durante la reacción entre el carbonato de calcio (CaCO $_3$) presente en 1 gramo de sedimento y 18 ml de ácido clorhídrico (HCl) al 15% de concentración. A partir de los valores de CO $_2$ liberados el calcímetro calcula el porcentaje de CaCO $_3$ existente en la muestra. Realizado por el Laboratorio de Suelos de INCITAP-CONICET de la Universidad Nacional de La Pampa.



Foto 5. Extracción de muestras de sedimentos de distintas profundidades durante la perforación de exploración.

En función de esta información se logró realizar un perfil litológico del terreno al asociar los resultados texturales y mineralógicos de las muestras sedimentarias, con las características de las formaciones geológicas que dominan la zona, específicamente la Formación Cerro Azul que contiene al denominado Acuífero Pampeano, objeto de estudio.

2.4 Tratamiento hidrodinámico

Se efectuó un inventario de pozos de explotación distribuidos en el área de estudio a partir de la observación de cartas topográficas, imágenes satelitales, entre otros para organizar una campaña de muestreo. A esto se le suma la información existente de perforaciones realizadas por la Administración Provincial del Agua (APA), con las correspondientes fichas de niveles piezométricos.

Posteriormente, se realizó una campaña de campo en noviembre de 2019 con el objetivo de medir los niveles estáticos del acuífero de interés (Foto 6). El muestreo se llevó a cabo en 39 establecimientos rurales que fueron georreferenciados con el uso de un GPS Garmin Monterra, mientras que en

simultáneo se midió la profundidad del nivel freático con una sonda piezométrica Solinst de 100 m, y una de 200 m suministrada por la APA para aquellas perforaciones o pozos cavados con profundidades mayores a 100 metros. Asimismo se contó con información previa de 14 niveles piezométricos medidos por la Administración Provincial del Agua (APA) en la misma época de la campaña realizada.



Foto 6. Medición de nivel estático durante las campañas de campo realizadas en noviembre de 2019.

Con esta información se efectuó un análisis de la red de flujo subterráneo, en sentido horizontal, a partir de la confección de planos de isopiezas. Las cotas topográficas para el cálculo del potencial hidráulico en cada punto, se obtuvo de las cartas topográficas obtenidas del IGN.

Del mismo modo, con fecha junio de 2018 se llevó a cabo, en la perforación realizada en la estación hidrometeorológica de la localidad de Arata, la instalación de un limnógrafo Génica (Foto 7), dispositivo electrónico destinado a medir y registrar valores de columna de agua. El mismo se encuentra protegido por una caseta metálica realizada a medida y fue programado con un intervalo de registro cada 4 horas. El sensor del limnógrafo se encuentra ubicado a 20 metros de profundidad, estando el nivel freático a 17 metros en el momento de la colocación. La información es almacenada en una memoria interna que luego es extraída con una PC portátil y el software LFLINK10 provisto por el equipo. A partir de estos registros se obtiene un conocimiento temporal de las fluctuaciones del nivel freático en la localidad de Arata, que forma parte de la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central (R2).



Foto 7. Limnógrafo instalado en la perforación de estudio de la estación hidrometeorológica de la localidad de Arata.

Por otro lado se cuenta con la información de las fluctuaciones del nivel freático de un piezómetro operado desde el año 1998 hasta la actualidad por la Administración Provincial del Agua (APA), ubicado en la localidad de Ingeniero Luiggi. El mismo fue utilizado para el cálculo de la recarga con los métodos de fluctuaciones del nivel freático y balance hídrico del suelo, ya que cuenta con un registro de datos temporalmente más extenso.

2.5 Tratamiento hidroquímico e isotópico

2.5.1 Precipitaciones

En el mismo predio de la estación hidrometeorológica de la localidad de Arata se llevó a cabo la instalación de dos colectores de agua de lluvia para la caracterización isotópica y determinación de cloruros (Foto 8). Se colectaron muestras de agua de lluvia mensuales para la determinación de isótopos estables (^2H y ^{18}O), y muestras de agua de lluvia por evento de precipitación diario para la determinación de cloruros.



Foto 8. Colectores de agua de lluvia instalados en la estación hidrometeorológica de la localidad de Arata.

A partir de las muestras obtenidas para isótopos estables se efectuó una recta meteórica isotópica representativa del área de estudio, con el fin de lograr conocer las características del agua de lluvia como principal entrada al sistema acuífero. Las determinaciones de isótopos estables del agua de lluvia se realizaron en el Laboratorio de Hidrología Isotópica del Grupo Hidrogeología de Mar del Plata, por espectroscopía laser OA-ICOS (Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy) con un equipo LGR 45-EP en el marco del Proyecto de la Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP) operado por la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Las muestras extraídas para cloruros fueron analizadas en el Laboratorio de Aguas del Departamento de Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UNLPam) con la utilización de un Espectrofotómetro UV visible Hach dr/4000 (Foto 9). Además se les midió pH y conductividad eléctrica con la sonda multiparamétrica Hanna Hi 9828 (Foto 9). La determinación de cloruros se realizó para el cálculo de la recarga por el método del balance del ion cloruro.



Foto 9. Determinación de cloruro con Espectrofotómetro UV visible Hach dr/4000.



Foto 10. Determinación de pH y conductividad eléctrica con sonda multiparamétrica Hanna HI 9828.

2.5.2 Agua subterránea

Durante las campañas de muestreo realizadas en noviembre de 2019, se extrajeron distintas muestras de agua subterránea en 39 establecimientos rurales (Figura 3) para análisis fisicoquímicos, elementos traza, especiación de As e isótopos, utilizando botellas de plástico resistente Ad-Leve de 1 litro para el primer análisis y de 100 ml para el resto. Inmediatamente luego de la extracción de muestras, se midieron *in situ* pH, conductividad eléctrica y temperatura con la sonda multiparamétrica de 6 electrodos Hanna Hi 9828 (Foto 11).

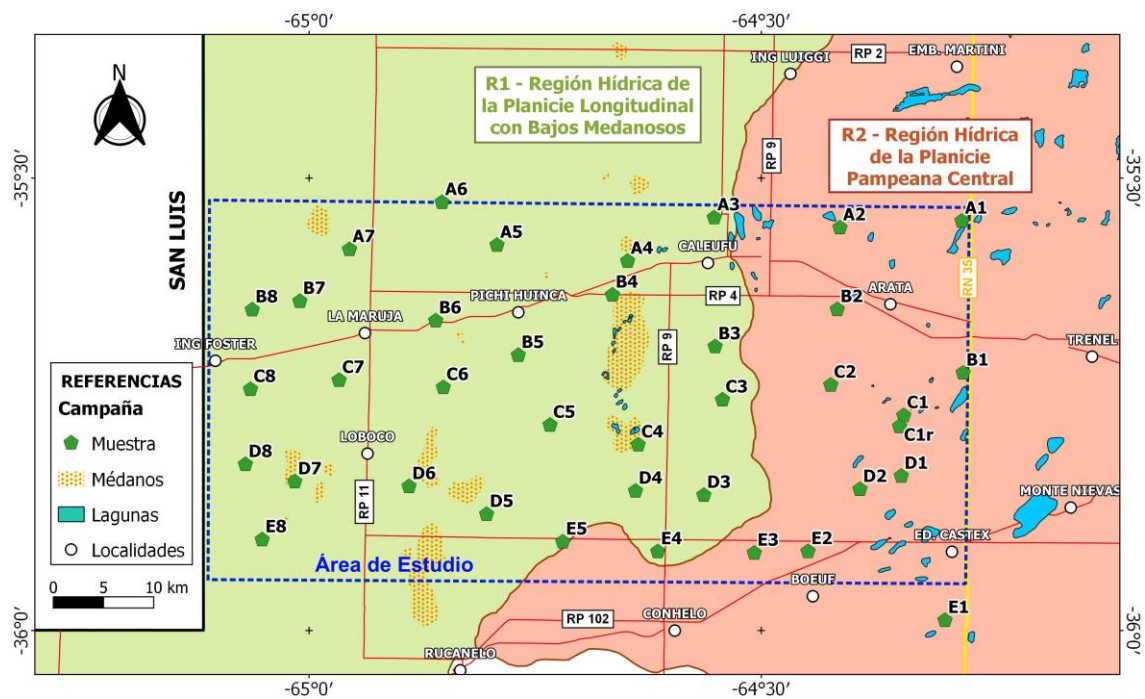


Figura 3. Ubicación de los establecimientos rurales donde se extrajeron muestras de agua.



Foto 11. Extracción de muestras (arriba) y medición *in situ* de parámetros fisicoquímicos (abajo).

Los análisis fisicoquímicos se realizaron en el Laboratorio de Aguas del Departamento de Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UNLPam) según técnicas convencionales (A.P.H.A. *et al.*, 1992), mediante un espectrofotómetro de barrido en espectro visible que posibilitó la determinación de residuo seco, conductividad eléctrica, pH, alcalinidad, dureza, iones principales, nitratos, nitritos y fluoruro.

Las determinaciones de elementos traza y especiación de arsénico fueron realizados por Activation Laboratories Ltd. (Canadá) por Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).

Finalmente, las determinaciones isotópicas (^2H y ^{18}O) de 30 muestras de aguas subterráneas extraídas durante el censo hidrogeológico, fueron analizadas por espectroscopia láser con un instrumento LGR LWIA 45-EP por el Grupo de Estudios Ambientales del Instituto de Matemática Aplicada de San Luis dependiente de la Universidad Nacional de San Luis y CONICET.

2.6 Metodología para el cálculo de la recarga

Para la estimación de la recarga se utilizó la información climática de la estación "Don Osvaldo" ubicada en proximidad a la localidad de Ingeniero Luiggi, el registro de las fluctuaciones del nivel freático del piezómetro de la misma localidad, los datos pluviométricos colectados en las estaciones policiales y, los valores de concentración de cloruros en precipitación y agua subterránea extraídos en la localidad de Arata. Los métodos aplicados son:

- **Balance hidrometeorológico del agua en el suelo:** se ejecuta en forma secuencial y con frecuencia de cálculo diario y permite calcular los almacenamientos de agua en el suelo a partir de la diferencia entre los aportes por precipitación y las pérdidas por evapotranspiración potencial calculada por el método de Thornthwaite y de Penman-Monteith (FAO, 1993). Como resultado se calculan la evapotranspiración real, la reserva de agua en el suelo y los excedentes que se originan cuando el contenido de humedad supera un valor máximo que está en función de la textura del suelo (capacidad de campo). Este dato resulta de interés por cuanto tales excesos son potencialmente generadores de la recarga. Se utilizó el código Visual Balan v.1.0 (Samper *et al.*, 1999).
- **Método de la "fluctuación del nivel freático":** (Healy y Cook, 2002) aplicable sólo a acuíferos libres y asume que el agua que llega al nivel freático pasa a integrar el almacenamiento subterráneo y es considerada recarga. Aunque el valor obtenido es puntual puede asumirse que la zona de influencia alcanza a cientos y aun a miles de metros cuadrados, mientras que la validez temporal está en función de la longitud del registro elegido (Scanlon *et al.*, 2002). Esta técnica se ajusta mejor a regiones con niveles freáticos someros con respuestas rápidas del nivel

freático a los eventos de recarga, lo que favorece la medición más precisa de los ascensos de nivel (Varni, 2005).

- **Balance de masa del ion cloruro:** se caracteriza porque a medida que la magnitud del flujo decrece debido a la evapotranspiración, la concentración de cloruros aumenta. Esto lo diferencia de la mayoría de los otros métodos, en los cuales la determinación de humedad se hace más difícil en los sectores más profundos de la zona no saturada (Scanlon, 1991). En un suelo que sólo está sujeto a pérdidas de agua por evapotranspiración, la concentración de cloruro deberá incrementarse gradualmente a medida que el flujo atraviesa la zona de raíces. Por debajo de este nivel y hasta la parte superior del acuífero el contenido de cloruro deberá mantenerse aproximadamente constante, siempre que no hay aportes ni sustracciones del mismo.

2.7 Método geofísico del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

Los sondeos eléctricos verticales o SEVs, constituyen uno de los métodos de campo para determinar la variación en profundidad de las propiedades eléctricas del subsuelo a partir de una serie de determinaciones de resistividades aparentes.

Se utilizó el método de Schlumberger el cual emplea 4 electrodos, dos de emisión y dos de medición, situados en línea recta (Figura 4); la variante con respecto al método de Wenner está en que la distancia entre los electrodos M y N debe ser mayor a un tercio de la distancia entre los electrodos de emisión A y B.

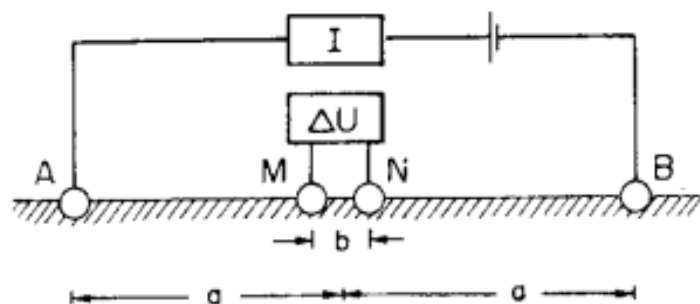


Figura 4. Arreglo del método de Schlumberger.

La diferencia de potencial (campo eléctrico), leída entre los electrodos (M y N), es producida por una corriente eléctrica de naturaleza continua y conocida. Esta corriente se hace circular por el subsuelo mediante los electrodos emisores (A y B), a expensas de una fuente de energía eléctrica.

Estos valores de Resistividad aparente y los valores de la secuencia de separación de los electrodos A y B, se introducen al programa de computación

IPI2Win para lograr la interpretación de los SEV, permitiendo identificar el número de capas, su espesor y su resistividad verdadera.

La metodología consiste en ir separando continuamente los electrodos de corriente a los fines de aumentar la profundidad de la investigación y conservando siempre el eje de simetría con respecto al punto prospectado. Esta diferencia de potencial leída está asociada a las características litológicas del subsuelo. En base a la corriente y diferencia de potencial leídos, se calcula la resistividad aparente a diferentes profundidades.

Esta resistividad se grafica en papel logarítmico de módulo adecuado y en función de la separación de los electrodos, se obtiene la denominada curva de campo de Resistividad Aparente.

Se efectuaron siete sondeos eléctricos verticales (SEV) (Figura 5) a lo largo de una recta dentro del área de estudio sobre la ruta provincial 4 (Foto 12), para conocer la profundidad del basamento y demás formaciones litológicas, y detectar variaciones en el perfil.

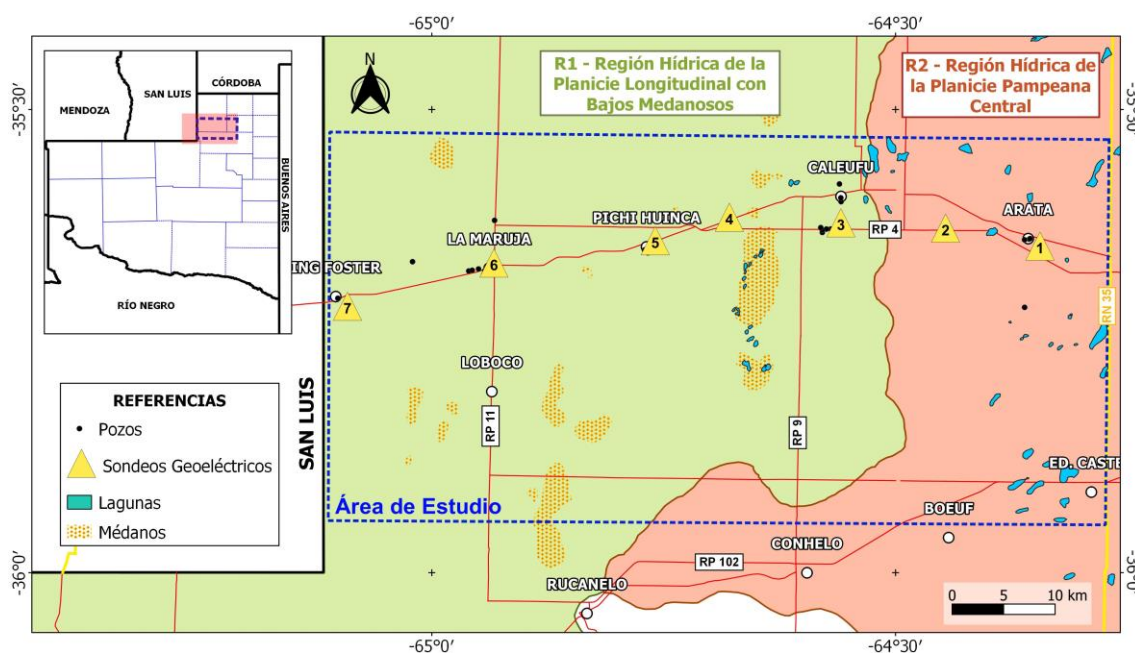


Figura 5. Ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV) en el área de estudio.



Foto 12. Campaña de sondeos eléctricos verticales (SEV).

2.8 Procedimiento de Extracciones Secuenciales (PES).

Se llevó a cabo el Procedimiento de Extracciones Secuenciales de arsénico (As) en sedimentos, basado en lo propuesto por Cacciabue *et al.* (2016) y Keon *et al.* (2001), con algunas modificaciones tomadas del procedimiento sugerido por Dold (2003), más específico para estudios sobre residuos mineros; y Bettoschi *et al.* (2018) aplicado a sedimentos marinos. Los sedimentos utilizados fueron los extraídos durante la perforación de exploración realizada por la APA en la localidad de Arata. Se utilizaron 4 muestras de distintas profundidades y características, pasadas por mortero y tamizadas a fin de separar la fracción limo-arcilla ($<63\ \mu\text{m}$) con un tamiz Zonytest (Foto 13).



Foto 13. Muestras de sedimentos pasadas por mortero (izquierda) y tamizadas (derecha).

El procedimiento consistió en colocar 1 g de muestra pesada en una balanza analítica electrónica digital Boeco, en contacto con 30 ml de la solución reactiva extractante correspondiente para cada paso (Tabla 1) en tubos de centrifuga

de polipropileno (PPCO). La suspensión se agitó en un Agitador Orbital DLAB (Foto 14) durante un tiempo específico para cada reactivo detallado en la Tabla 1 y luego se centrifugó durante 20 min a 12.000 rpm en una Ultracentrífuga refrigerada de alta velocidad HITACHI CR22G (Foto 15). El sobrenadante se trasvasa a un tubo de 50 ml por medio de una jeringa de 60 ml, El sobrenadante se trasvasa a un tubo de 50 ml por medio de una jeringa (Foto 16). El sólido remanente se enjuagó dos veces con agua miliQ, en cada enjuague se agitó el tiempo correspondiente, se centrifugó, y finalmente se extrajo el sobrenadante con una jeringa, y se lo agregó al tubo de la muestra. Con el sedimento restante en el tubo de centrifuga, se procedió a agregar el siguiente reactivo y repetir el procedimiento para cada paso de extracción. Durante la realización del paso 4 se utilizó un baño termostático para mantener las muestras a la temperatura correspondiente. El sobrenadante obtenido en cada paso fue enviado al Laboratorio de SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino) para ser analizado a través de ICP-MS.



Foto 14. Agitación de las muestras con agitador orbital DLAB.



Foto 15. Muestras dentro de la ultracentrífuga (izquierda) y muestras ya centrifugadas (derecha).

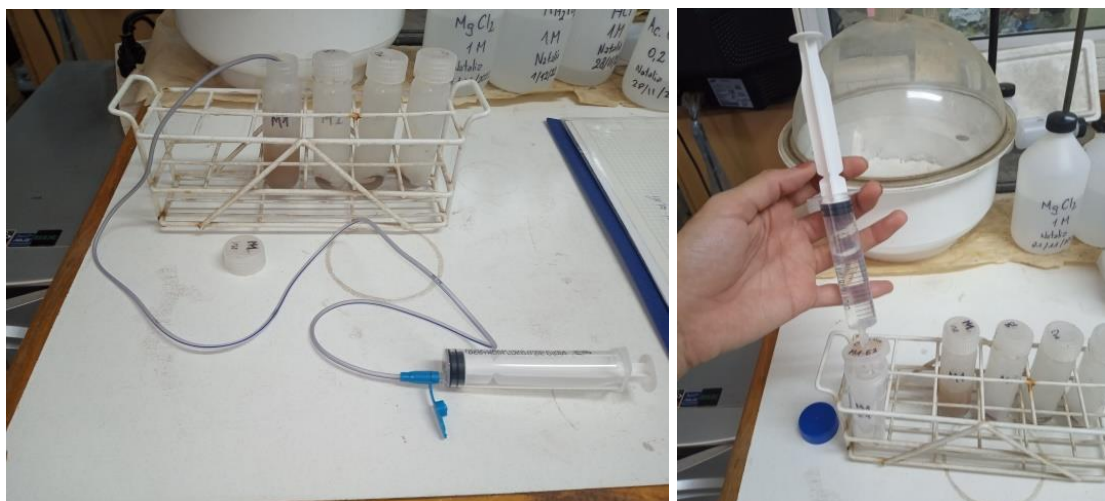


Foto 16. Extracción del sobrenadante con jeringa (izquierda) y filtrado con filtros descartables de PVDF de 0,45 μ m (derecha).

Tabla 1. Descripción y detalle de los pasos realizados durante el PES de As aplicado.

Paso	Extractante	Fase Extraída	Condiciones	Lavado
1	MgCl ₂ 1M	As ligado a sales solubles en agua y As ligado iónicamente.	Agitación durante 3 horas, a pH 8, a 25°C.	Dos lavados de 8 y 9 ml con agua miliQ. Agitado por 15 min cada lavado.
2	KH ₂ PO ₄ 1M	As fuertemente adsorbido.	Agitación durante 24 horas, a pH5, a 25°C.	Dos lavados de 8 y 9 ml con agua miliQ. Agitado por 15 min cada lavado.

Paso	Extractante	Fase Extraída	Condiciones	Lavado
3	HCl 1M	As co-precipitado con sulfuro ácido volátil (AVS), carbonatos, óxidos de Mn, e hidróxidos de Fe muy amorfos.	Agitación por 2 horas, a 25°C.	Dos lavados de 8 y 9 ml con agua miliQ. Agitado por 15 min cada lavado.
4	Ácido Oxálico 0,2 M	As co-precipitado con oxi-hidróxidos de Fe amorfos. As co-precipitado con óxidos de Fe.	Agitación por 3 horas, a pH 3, a 80°C en baño de agua, en oscuridad.	Dos lavados de 8 y 9 ml con agua miliQ. Agitado por 15 min cada lavado.

3 CLIMATOLOGÍA

3.1 Clima Regional

Los elementos del clima que definen el estado medio de la atmósfera en un determinado lugar, como la temperatura, presión atmosférica, humedad, vientos y precipitaciones, se encuentran condicionados a distintos factores geográficos como la latitud, relieve, distancia al mar, altitud; y astronómicos que involucra a los movimientos propios de la Tierra.

La Argentina se extiende, en su parte continental, aproximadamente desde los 22° hasta los 55° de latitud sur y su extensión latitudinal es de aproximadamente 3.700 km. A lo largo del país va cambiando el ángulo de incidencia de los rayos solares y la duración de las horas de luz, lo que produce importantes modificaciones sobre los elementos del clima, principalmente sobre la radiación solar y la temperatura del aire (Bianchi y Cravero, 2010).

Por su parte la Cordillera de los Andes en el oeste también es uno de los grandes condicionantes climáticos en el país. Desde los 40°S hacia el norte, la cordillera es más alta, lo que provoca un bloqueo del aporte de humedad desde el Océano Pacífico, que, sumado a la lejanía del Océano Atlántico, el clima de esta región adquiere características continentales. Pero, desde los 40°S hacia el sur, la cordillera disminuye en altitud y el ascenso orográfico de los vientos del oeste, producen precipitaciones en una angosta franja, volviéndose secos hacia la meseta patagónica.

En las zonas centro este y noreste del país el relieve no supera los 500 m s.n.m. Por ende, la región presenta condiciones de mayor humedad, mayor temperatura media y menor amplitud térmica a causa de la influencia del Océano Atlántico, de donde provienen vientos húmedos (Instituto Nacional Geográfico, 2020). El agua absorbe y desprende calor más lentamente que la tierra, por lo que puede calentar o enfriar el ambiente, por ello, en las regiones cercanas a océanos permite que las temperaturas sean más constantes en el tiempo. En cambio, las regiones continentales, al alejarse de la influencia de los vientos húmedos del océano, tienen climas con mayor amplitud térmica (Bianchi y Cravero, 2010).

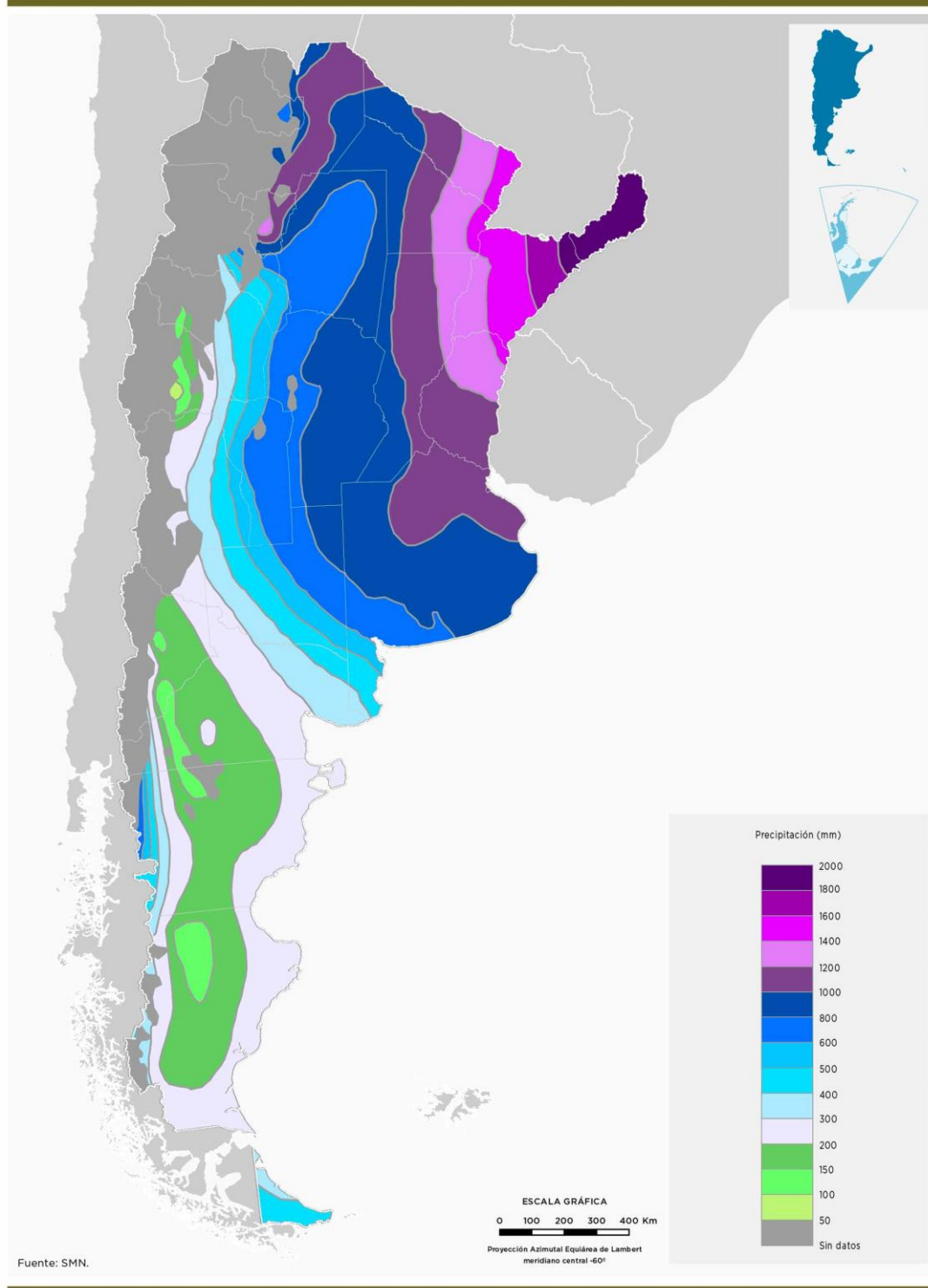
Argentina tiene gran influencia de dos anticiclones que poseen intensidad similar e igual posicionamiento respecto a la latitud, ubicados sobre los Océanos Atlántico y Pacífico. Hacia el norte de los 40°S, los vientos provienen principalmente del anticiclón del Atlántico Sur y en consecuencia, los vientos predominantes son del noreste y este. A partir de los 40°S hacia el sur, debido al descenso de altura de la Cordillera de los Andes, comienza a notarse la influencia del anticiclón del Pacífico Sur, predominando sobre toda la Patagonia

vientos intensos y secos del oeste y sur oeste. En verano, al calentarse mucho más el continente, se constituye un ciclón o centro de baja presión en el Noroeste Argentino (NOA). Esto genera que en la zona oriental y central del país se reciban aportes de aires calientes y húmedos desde el Atlántico.

La provincia de La Pampa se encuentra ubicada entre los 32°S y 38°S en el centro del país, y se encuentra influenciada por el factor orográfico debido a la presencia de la Cordillera de los Andes, que afecta principalmente la zona occidental provocando condiciones de mayor aridez. Esta zona recibe predominantemente los vientos fríos y secos del oeste y suroeste, y contribuye a formar un clima árido y semiárido. En cambio, la zona oriental de la provincia, al presentar una menor altitud y encontrarse un poco más cercana al Océano Atlántico, se encuentra mayormente favorecida por los vientos húmedos y calientes, principalmente en época estival debido a la formación del ciclón del NOA. En general, toda la provincia se ve afectada por el efecto de continentalidad con amplitudes térmicas que van disminuyendo a medida que se avanza hacia la zona más oriental, la cual presenta mayor influencia marítima. Por el contrario, la diferencia entre la temperatura máxima y mínima es más marcada hacia el oeste, donde el efecto orográfico es mayor.

Respecto al régimen de precipitaciones, la provincia presenta una gran variación en sentido noreste-suroeste, también influenciado tanto por la barrera orográfica como por la cercanía al mar. En el mapa de isohietas de Argentina 1981-2010 de la Figura 6, se observa que en el sector oeste y suroeste las precipitaciones comienzan en un rango de 200 mm anuales, que van en continuo aumento hacia el sector noreste hasta alcanzar los 800 mm anuales. En este sector este y noreste de la provincia predominan zonas subhúmedas debido a los vientos húmedos del Atlántico. En cambio, el sector oeste se encuentra desprotegido de la influencia de los vientos fríos y secos del Océano Pacífico, presenta un alejamiento de la fuente de humedad del Océano Atlántico y un aumento de la altura del terreno, por ello se puede observar una disminución importante en las precipitaciones.

Precipitación anual. Período 1981-2010



REPÚBLICA ARGENTINA
Parte continental americana

Instituto Geográfico Nacional - ANIDA

Figura 6. Isohietas de precipitación anual de la Argentina para el período 1981-2010 (extraído de Gentile *et al.*, 2020).

Otro fenómeno propio de América del Sur que afecta periódicamente al país, incluyendo a la provincia de La Pampa, son las oscilaciones en la temperatura en el Océano Pacífico intertropical, denominado “El Niño” cuando las anomalías son positivas, de 6 a 7°C por encima de la temperatura media; y “La Niña” cuando las oscilaciones son negativas. Este fenómeno ocurre debido a que los vientos alisios del cordón ecuatorial con dirección SE-NO en el hemisferio sur, arrastran las aguas cálidas del Pacífico hacia Australia, generando el efecto de “La Niña” en América del Sur. Pero periódicamente, se produce una inversión de las corrientes atmosféricas, generando una migración de las aguas cálidas hacia América del Sur, ocasionando el efecto de “El Niño” (Bianchi y Cravero, 2010).

Cuando las anomalías son positivas (año Niño), generalmente se lo asocia a un aumento considerable de las precipitaciones y provocando consecuentes inundaciones. Este aumento de las lluvias incide favorablemente en la producción de secano de la Provincia de La Pampa, en las áreas semiáridas-subhúmedas; mientras que el fenómeno contrario (La Niña) se asocia con extremas sequías en la misma región. Cuando el “El Niño” adquiere valores extremos, como en el año 1997-98 se producen excesos hídricos extraordinarios que pueden incidir negativamente sobre la producción agrícola-ganadera de la provincia y el resto del país (Bianchi y Cravero, 2010).

Particularmente en Argentina, en la región pampeana, el clima también se encuentra influenciado por la interacción de dos corrientes marinas: la fría de Malvinas y la cálida de Brasil, que actúan en forma opuesta. Cuando la primera avanza hacia latitudes menores genera un enfriamiento similar a “La Niña”, mientras que cuando la de Brasil se dirige hacia latitudes mayores el efecto es similar al de “El Niño”. Por lo tanto el Niño y la Niña se hacen sentir en forma plena en la región si coinciden con un proceso de igual signo sobre el Océano Atlántico. Cuando lo hacen con un proceso de signo contrario pueden quedar neutralizados (Brescia *et al.*, 1998).

Por otra parte, la distribución de las precipitaciones a lo largo del año en la provincia, dependen de las masas de aire prevalecientes. Cuando el ciclón del NOA desciende unos grados de latitud hacia el sur, las lluvias son más intensas en época estival, dado que favorece el ingreso de las masas de aire húmedas del Atlántico desde el este-noreste y las masas de aire frías y secas desde el sur-suroeste, provenientes del Pacífico. Este choque frontal de masas de aires, generan un régimen de precipitaciones caracterizado por una estación estival lluviosa y una estación invernal preferentemente seca como se observa en la Figura 7. Existen dos máximos en el régimen medio anual de precipitaciones, uno en octubre-noviembre y otro en marzo-abril (Barros y Perczyk, 2006).

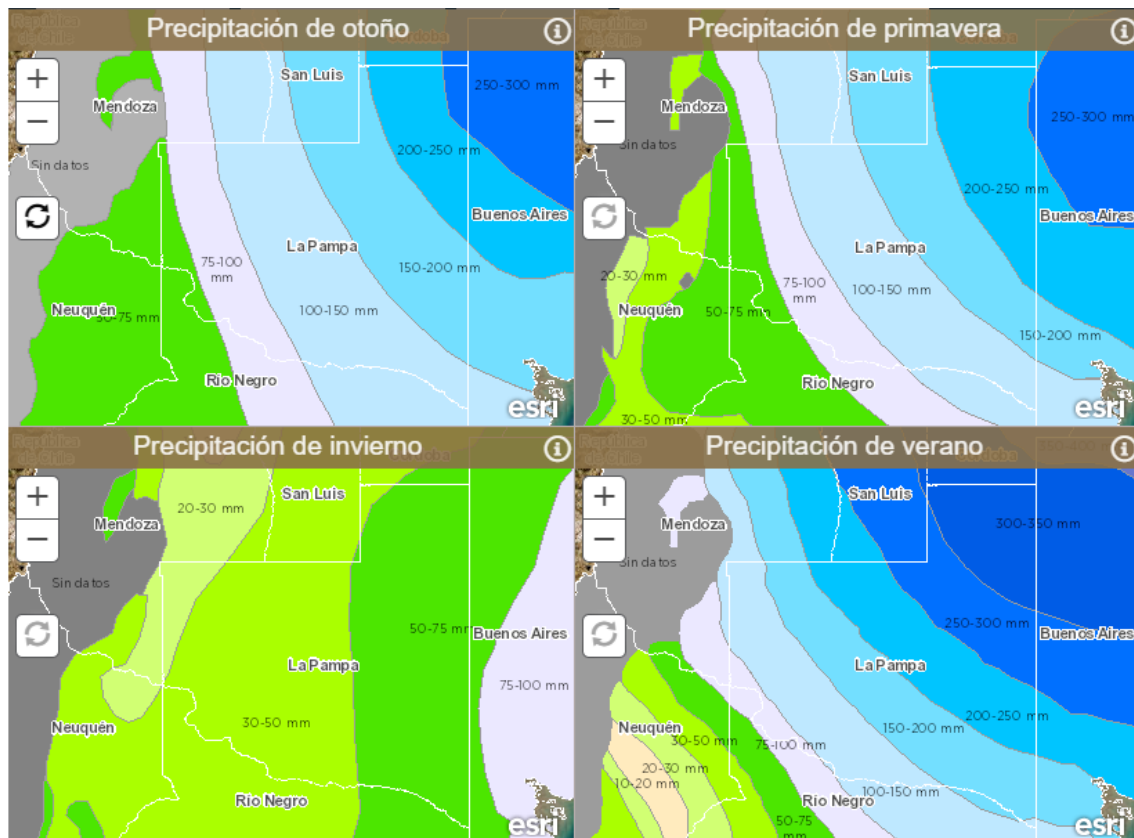


Figura 7. Isohietas de la provincia de La Pampa para las distintas estaciones del año (otoño, primavera, invierno, verano) del período 1981-2010 (extraído de Gentile *et al.*, 2020).

Con respecto al régimen térmico de la provincia, las variaciones de temperatura son más importantes en sentido N a S, disminuyendo hacia el sur; aunque también adquieren valor las que ocurren en el extremo occidental dado que tiene una marcada influencia el factor altitud, provocando también una importante disminución hacia el oeste.

En general, la provincia de La Pampa se caracteriza por poseer una temperatura media anual entre 14° y 16°C. Presenta una gran amplitud térmica anual que puede alcanzar valores generales de 16°C que refleja el carácter continental que se menciona anteriormente, el cual se incrementa hacia el sector occidental.

El Instituto Geográfico Nacional en su Atlas Nacional Interactivo de Argentina (Gentile *et al.*, 2020), realiza una clasificación de los climas del país basándose en la clasificación mundial de Koppen (Kottek *et al.*, 2006) que considera elementos como la temperatura y precipitaciones combinados con los factores orográficos. Tomando esto en consideración, La Pampa se encuentra notoriamente identificada con tres diferentes tipos de climas que se detallan en la Figura 8. Hacia el oeste predomina principalmente un clima árido denominado “De la estepa patagónica”, caracterizado por escasas precipitaciones por el efecto orográfico de la Cordillera de los Andes y el alejamiento de las fuentes de humedad. Hacia el este, por el contrario, se

caracteriza por un clima templado “Pampeano”, cuyas precipitaciones son más abundantes por el efecto moderador del mar, produciendo máximas precipitaciones en meses de otoño y primavera. Mientras que en el centro de la provincia, se halla un clima de tipo semiárido cálido “De transición”, con características intermedias entre los otros dos mencionados.

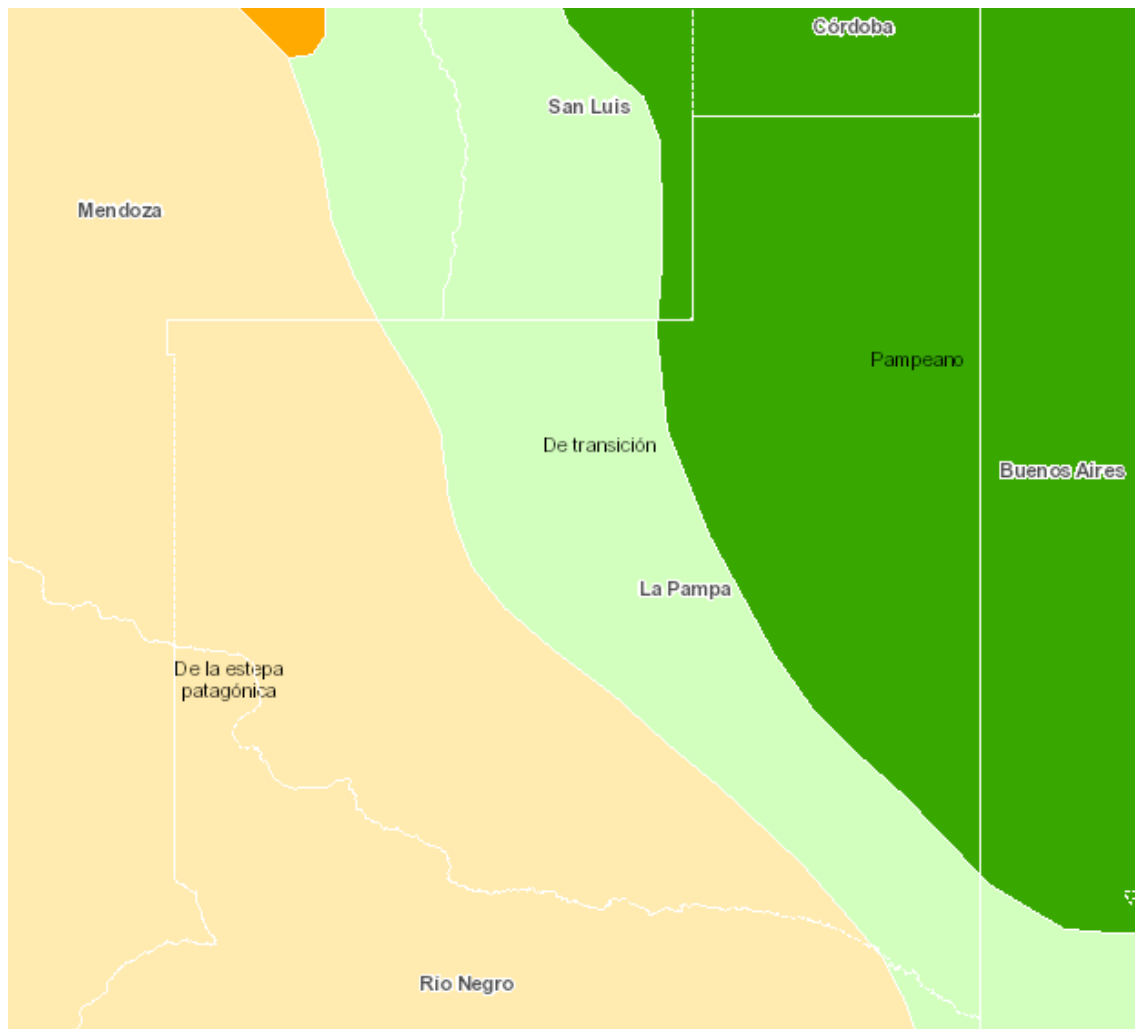


Figura 8. Tipos de Climas de la Provincia de La Pampa. Extraído de Gentile *et al.* (2020).

Cano *et al.* (1980), realiza una clasificación climática de la provincia, determinando regiones hídricas en base a los resultados de los índices hídricos (IH) de Thornthwaite, el cual integra y relaciona el exceso y la deficiencia de agua obtenido de balances hídricos. Los resultados negativos son indicadores de climas de características áridas o semiáridos, y los valores positivos indican climas más bien húmedos. De esta manera, se distinguen tres regiones coincidentes aproximadamente en sus límites con las establecidas en Gentile *et al.* (2020). En el sector oeste se encuentra la Región Árida (IH = -40 a -60) cuyo marcado déficit hídrico sólo permite actividad ganadera rudimentaria. En el sector oriental se encuentra la Región Subhúmeda Seca (IH = -20 a 0) en la cual existe un déficit hídrico mayormente marcado en el verano, y la

precipitaciones pueden alcanzar en el extremo oriental los 800 mm anuales, lo que permite actividades de agricultura de secano y ganadería. Entre estas dos regiones, se encuentra la Región Semiárida (IH = -20 a -40), la cual es una zona de transición y permite actividades principalmente de ganadería extensiva y siembras forrajeras.

3.2 Clima Local

La Pampa es una región de transición climática, donde se observa una región subhúmeda seca en el sector nororiental, que gradualmente se convierte en una región semiárida para luego finalizar hacia el oeste como una región árida (Cano *et al.*, 1980). Estas variaciones climatológicas afectan determinados elementos como las precipitaciones, humedad, temperatura, entre otras, a lo ancho y largo de la provincia. Los límites entre las regiones son líneas difusas, y van variando a medida que también varían estos parámetros climáticos, pudiendo desplazarse hacia la izquierda o derecha dependiendo de la época. Por ello, las condiciones climáticas han sido motivo de estudio en la provincia a lo largo del tiempo dado a sus importantes fluctuaciones.

En el área de estudio se encuentra el límite entre la región subhúmeda seca hacia el este (o Clima Pampeano), y la región semiárida hacia el oeste (o Clima de transición), abarcando mayormente la primera (Figura 8). Se observa claramente una variación en el régimen de precipitaciones, aumentando desde el SO hacia el NE, abarcando las isohietas de 650 a 800 mm anuales.

El sector occidental semiárido del área, se caracteriza a su vez, por presentar una temperatura media de 15,6°C. Los veranos son cálidos, con una temperatura media de 23,1°C, y los inviernos presentan una temperatura media de 8,2°C. Ambas estaciones son más benignas comparados con el oeste de la provincia, lo que se debe al aumento de la humedad relativa por incidencia de los vientos del Atlántico. Los vientos dominantes en el área son N-NE por el motivo mencionado anteriormente, y S-SO provenientes del anticiclón del Pacífico, y presentan una velocidad media anual de unos 10 km/h, siendo en primavera la época en que poseen mayor intensidad. Esta región semiárida se caracteriza fisiográficamente por la presencia de bosques de caldén (*Prosopis caldenia*) lo que actúa como una barrera ante la influencia erosiva de estos vientos (Cano *et al.*, 1980).

El sector oriental subhúmedo del área de estudio, a lo que respecta al régimen de temperaturas, es muy similar al mencionado anteriormente, con la diferencia de que los inviernos y veranos se vuelven un poco más templados debido a un incremento de la humedad relativa. Las fechas medias de primeras y últimas heladas ocurren con mayor retraso y adelanto respectivamente (Casagrande *et al.*, 2006), comparándolo con la región más semiárida. Las direcciones de los

vientos predominantes no difieren de la región occidental, pero la velocidad media anual es un poco mayor, entre 10-12 km/h.

3.3 Precipitación

3.3.1 Verificación y ajuste de datos pluviométricos

Para el análisis de las precipitaciones se utilizaron los datos de estaciones pluviométricas de 6 localidades ubicadas dentro del área de estudio y de dos ubicadas en cercanía, con el objetivo de cubrir el sector sur del área, donde no se cuentan con datos pluviométricos. Los datos obtenidos corresponden a las localidades de Arata, Caleufú, Pichi Huinca, La Maruja, Ingeniero Foster, Eduardo Castex, Conhelo y Rucanelo (estas últimas cercanas al área) del período 1928-2019.

Con el motivo de detectar si los registros de las estaciones estudiadas presentan errores sistemáticos o puntuales se utilizó el “Análisis de Doble Masa”. Este método considera que los valores de precipitación que ocurren en diferentes puntos de una zona meteorológica homogénea en períodos anuales, guardan una relación de proporcionalidad que puede representarse gráficamente. En dicho gráfico de dispersión, se representan datos de precipitación anual acumulada de una estación base cuyos datos sean de mayor confianza en el eje de las abscisas, y en el eje de coordenadas se grafican los datos de una estación a controlar correspondiente al mismo período. Esta regresión entre las estaciones genera una tendencia lineal y, a partir de ésta, se pueden definir períodos con datos erróneos si los puntos se desalinean con dicha recta y, por lo tanto, es necesario efectuar correcciones. Mientras que si los datos se alinean correctamente, se considera que no presentan errores.

En la Figura 9 se observan los contrastes realizados con este método, correspondientes a 7 de las localidades del área de estudio. Los gráficos presentan una alta correspondencia entre las estaciones contrastadas con un valor de R^2 que varía entre 0,9995 y 0,9998. Estos resultados indican la ausencia de errores en las estaciones a tratar.

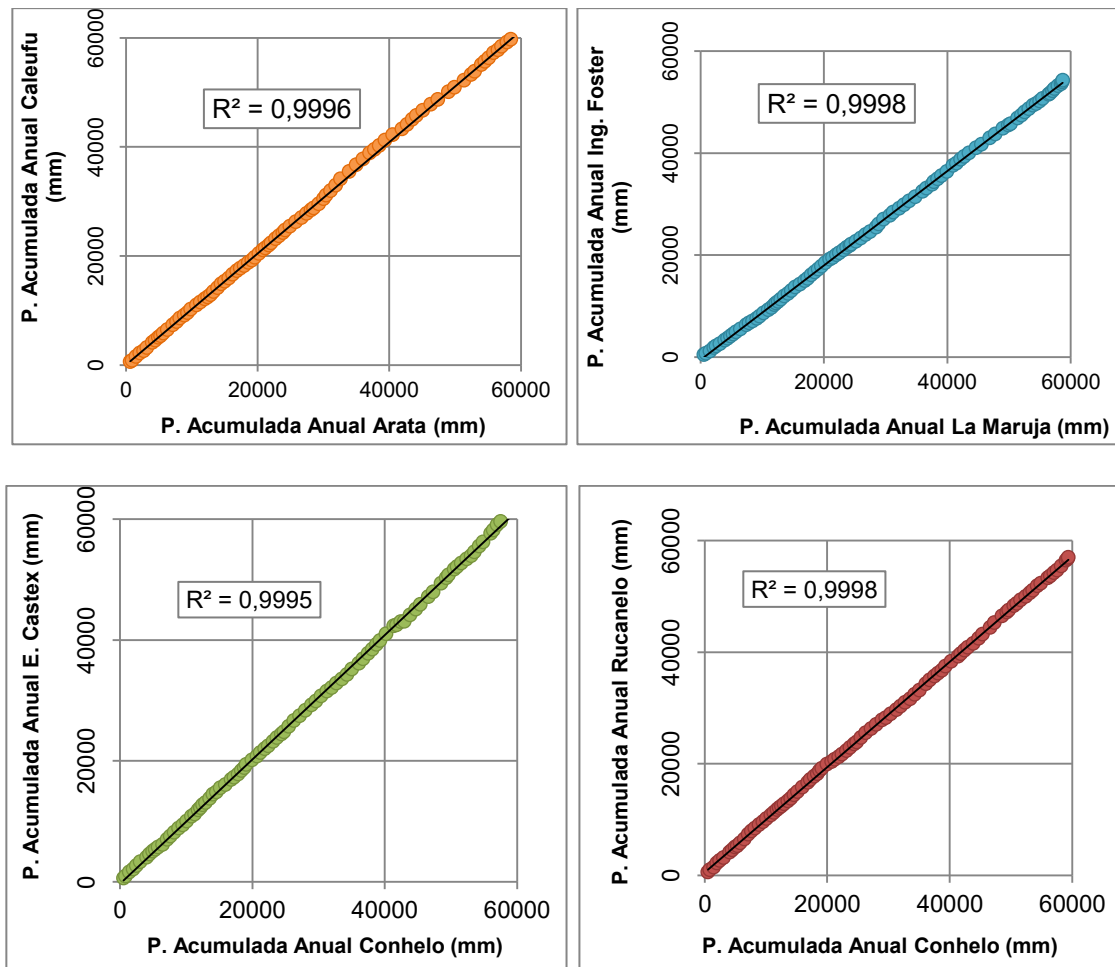


Figura 9. Análisis de Doble Masa de las estaciones pluviométricas de las localidades dentro del área de estudio.

Los datos registrados en la localidad de Pichi Huinca presentaron valores que diferían con las líneas de tendencia generadas al contrastar dichos datos con los de las localidades vecinas. Por ello, se tomaron tres estaciones vecinas cuyos registros anuales fueran confiables para conformar una “estación base”: Caleufú, La Maruja e Ingeniero Foster. En cada año se promediaron los valores anuales de cada estación y se obtuvieron los valores acumulados por años sucesivos. Se contrastaron los datos de la estación base y los de la estación de Pichi Huinca, y se observaron variaciones en la pendiente de la recta en el período 2012-2019 que indicarían valores erróneos que deben ser corregidos para dicha época (Figura 10). Para ello se utilizó un factor de corrección que es proporcional a la variación de la pendiente, y se obtiene a partir del cociente entre las pendientes de la recta original (P_o) y la recta desviada (P_d), resultando en un valor de 2,35. Con dicho factor se corrigieron los valores anuales sin acumular del período a corregir para la estación Pichi Huinca y se reiteró el contraste con la “estación base” obteniendo un valor R^2 de 0,9995 como se observa en la Figura 11.

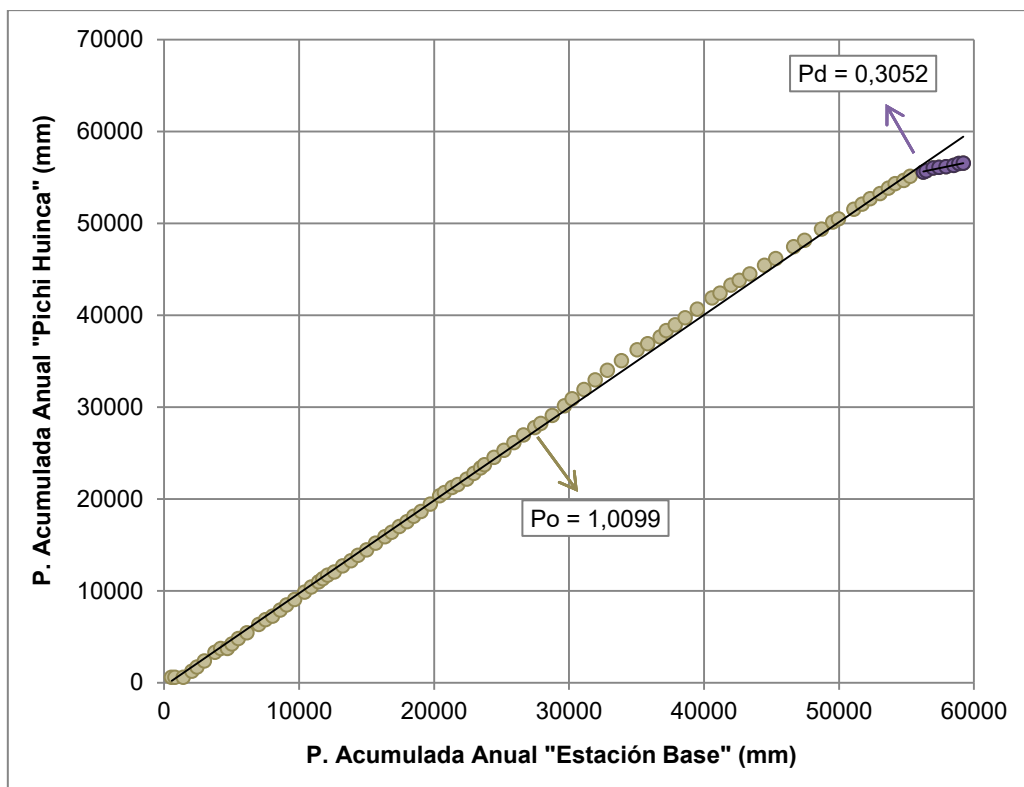


Figura 10. Análisis de Doble Masa entre la estación pluviométrica de la localidad de Pichi Huinca y la "Estación Base". Determinación de las pendientes P_o y P_d para determinar el Factor de Corrección del período 2012-2019.

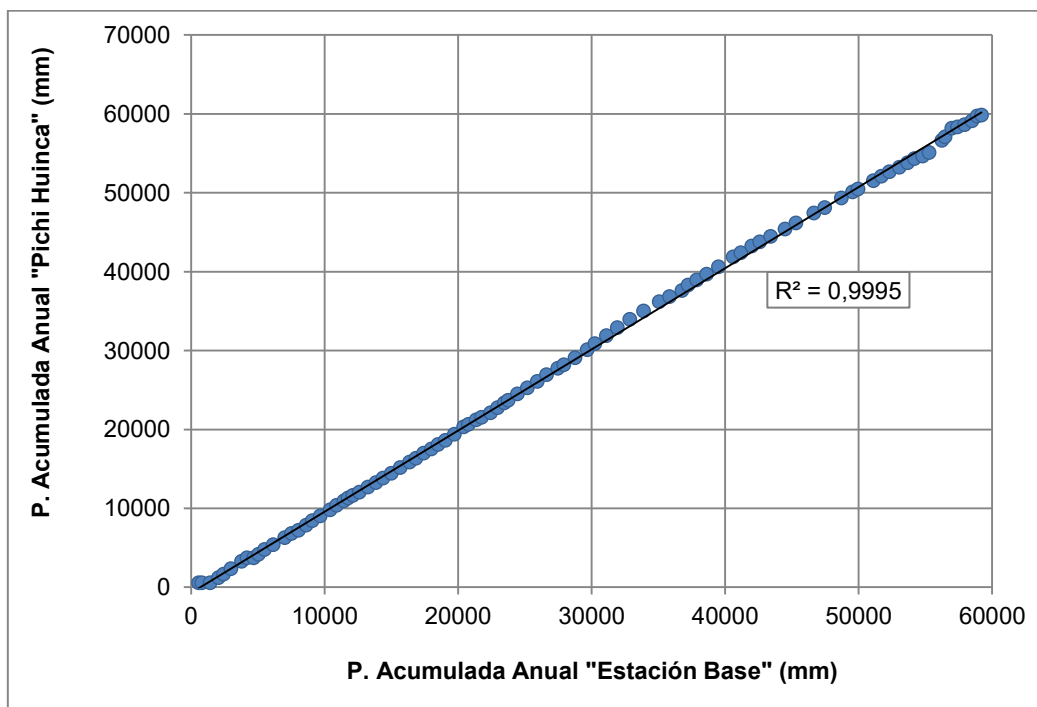


Figura 11. Análisis de Doble Masa entre la estación de Pichi Huinca y la "estación Base" posterior a la corrección de los registros del período 2012-2019.

3.3.2 Precipitación media anual del área

Para contar con un valor medio representativo del área de estudio, se obtuvo el valor de precipitación media anual a partir del método de la media aritmética, con el cual se obtuvo un resultado de 655,7 mm para el período 1928-2019 (± 39 mm). La mínima precipitación media anual de la zona se determinó hacia el oeste en la localidad de Ingeniero Foster con un valor de 590,2 mm, mientras que los máximos valores se encontraron en el extremo noreste en las localidades de Caleufú y Arata, con valores de 702,5 mm y 692,5 mm respectivamente. Existe un claro aumento de las precipitaciones en sentido SO-NE como se observa en las isohietas de la provincia, influenciado por la entrada de los vientos húmedos del Océano Atlántico hacia el este.

Teniendo en cuenta la gran extensión de la zona estudiada, se consideró conveniente utilizar la metodología de polígonos de Thiessen (Tabios III y Salas, 1985) para obtener un valor de precipitación media anual que contemple la distribución espacial (Figura 12). Se utilizaron dos estaciones que se localizan por fuera del área para completar el sector sur, Rucanelo y Conheló; y se consideró sólo la superficie de los polígonos encuadrada dentro del área de interés. Se obtuvo un valor de precipitación media anual de 660,3 mm, el cual no difiere significativamente con el calculado con el método de la media aritmética, de modo que las estaciones pluviométricas se encuentran distribuidas relativamente de manera homogénea (Sánchez, 2017).

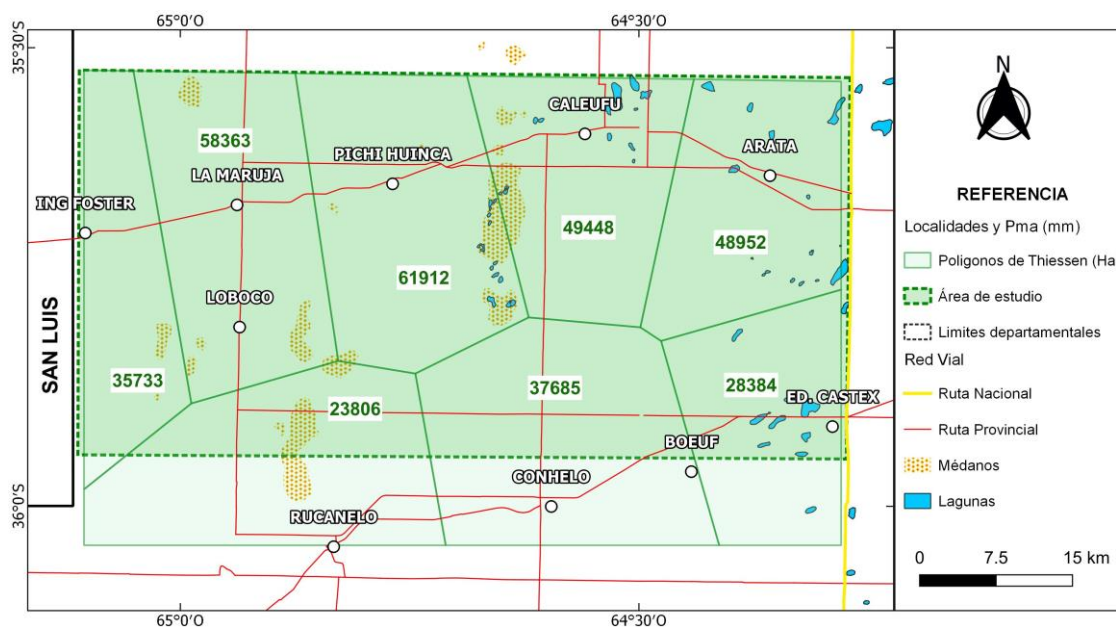


Figura 12. Polígonos de Thiessen del área de estudio, correspondientes al período 1928-2019.

3.3.3 Comportamiento pluviométrico

Considerando que se cuenta con una extensa serie de años (1928-2019), para el análisis temporal de las precipitaciones acumuladas anuales se empleó el

método de los percentiles (García de Pedraza y Ruíz, 1989), de los cuales se utilizaron $P_{0.10}$, $P_{0.25}$, $P_{0.75}$ y $P_{0.90}$ para determinar distintas épocas de humedad, sequía o años normales (Figura 13). El valor de precipitación acumulada para cada percentil es representativo del porcentaje de años que se encuentran por debajo de dicho valor en la totalidad de la serie climática para cada una de las estaciones pluviométricas.

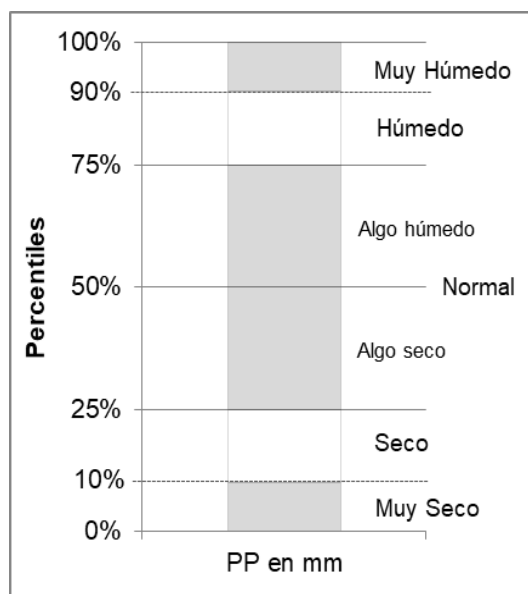
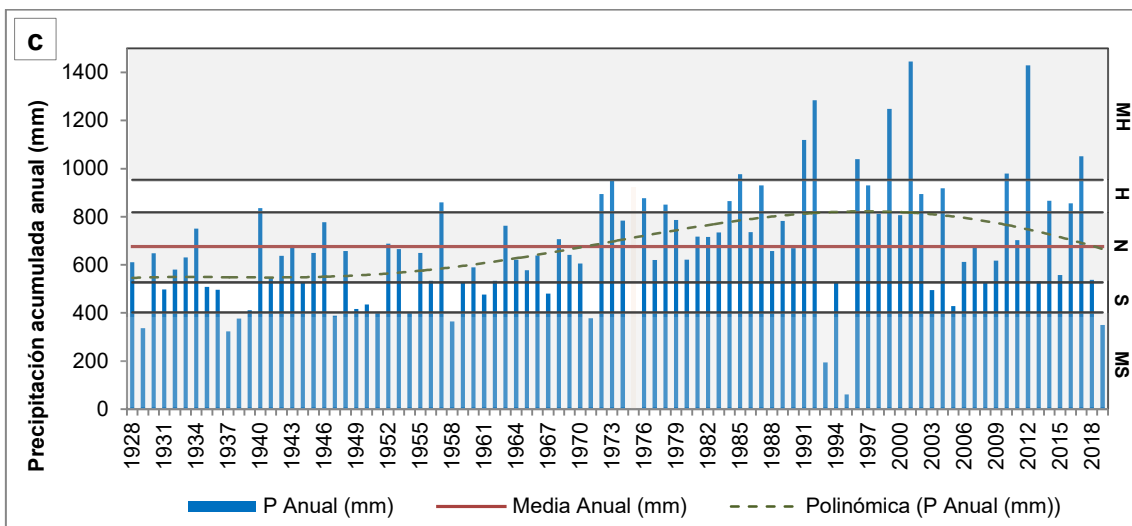
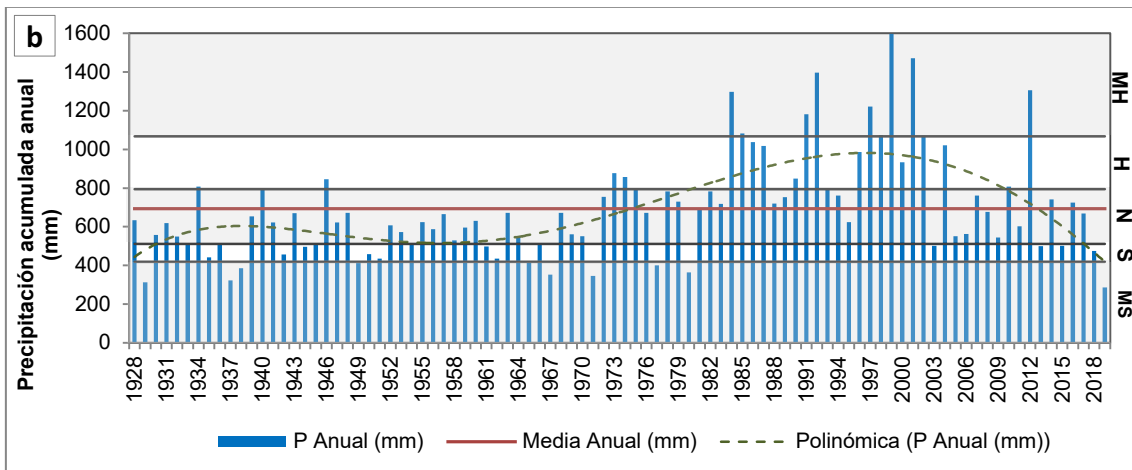
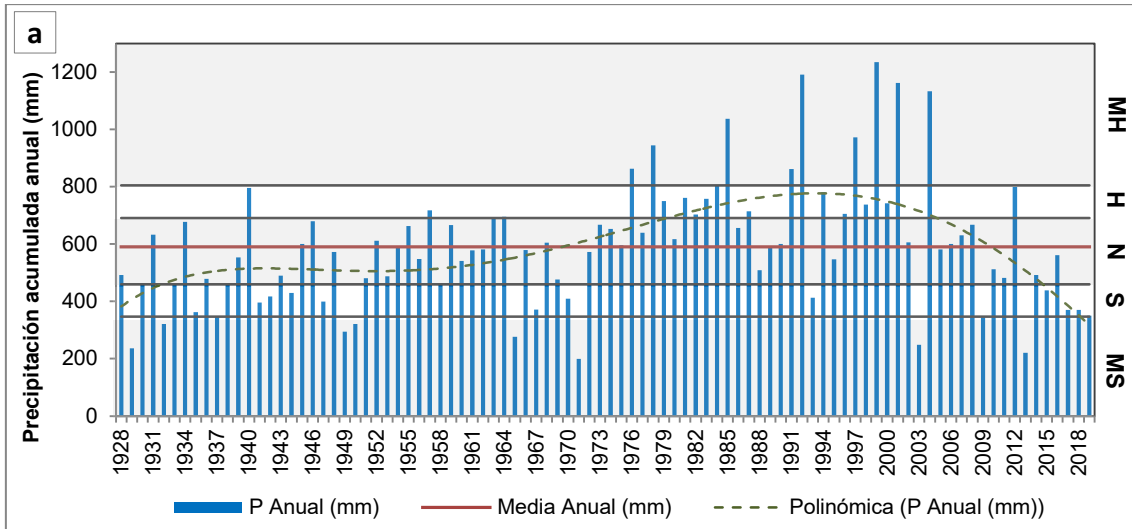


Figura 13. Percentiles utilizados para determinar las épocas secas, normales y secas para cada estación pluviométrica (García de Pedraza y Ruíz, 1989).

Este análisis temporal de las estaciones pluviométricas, para la serie 1928-2019, tuvieron en general un comportamiento similar entre sí como se observa, a modo de ejemplo, en los gráficos de las localidades de Arata, Ingeniero Foster, Eduardo Castex y Rucanelo en la Figura 14 (a, b, c, d).

Se observa que las precipitaciones en este sector nororiental de la provincia presenta una época seca/muy seca hasta 1940, seguida por una época normal a húmeda hasta la década de 1950. Posteriormente, hasta 1970 la tendencia disminuyó un poco tendiendo a una época de régimen normal. Luego se definió una época húmeda a partir de 1970 que coincide con lo mencionado en Vergara *et al.* (2005), con un pico a comienzos de 1990 y otro pico máximo alcanzado a fines de la misma década y comienzos del 2000. Prosigue un descenso importante de las precipitaciones con una tendencia a normal/seca, con un pico muy húmedo en el año 2012, que vuelve a descender abruptamente a años normales/secos hasta alcanzar una época de sequía importante en los años 2018-2019.



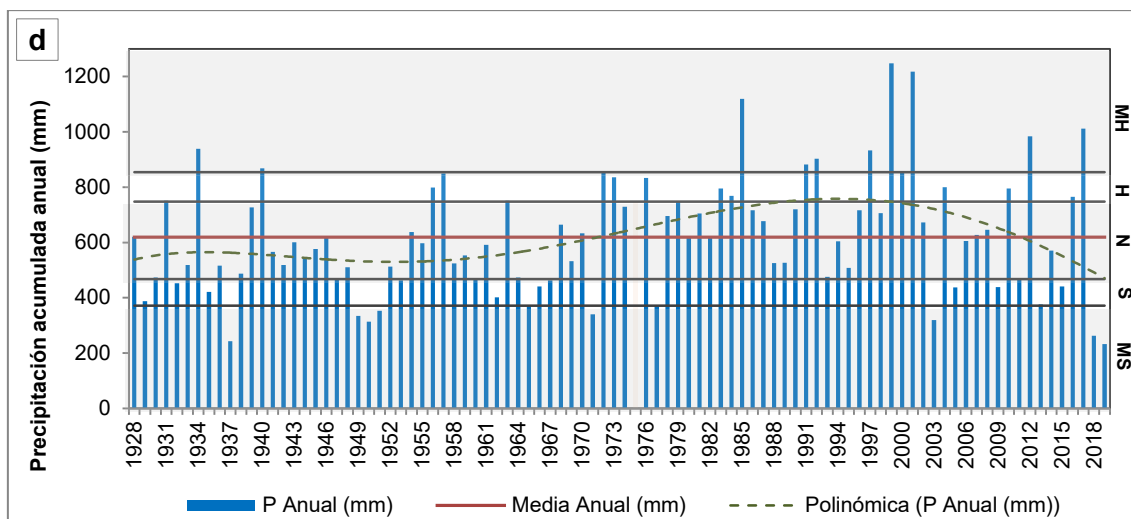


Figura 14. Precipitación anual (P Anual) acumulada para el período 1928-2019 con distinción de épocas muy húmedas (MH), húmedas (H), normales (N), secas (S) y épocas muy secas (MS). a) Ingeniero Foster; b) Arata; c) Eduardo Castex; d) Rucanelo.

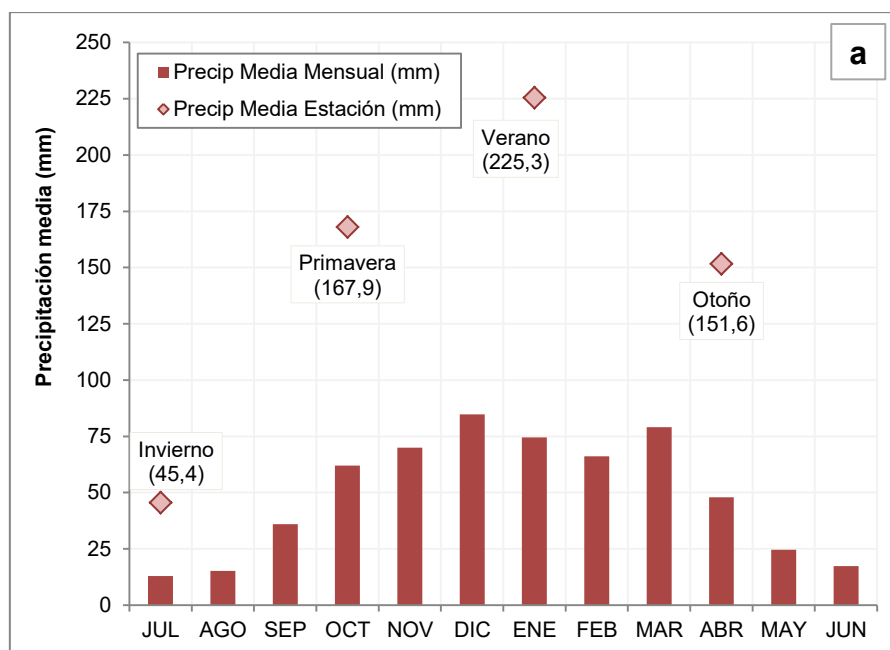
Este patrón positivo en las precipitaciones que se produce a partir de la década del '70, reflejada claramente con la línea de tendencia polinómica (grado 5) en las figuras, sumado a la frecuencia de precipitaciones extremas que se observan en determinados años (por ejemplo 1999 y 2001), han tenido como consecuencia frecuentes inundaciones y anegamientos de terrenos bajos en gran parte del este de la provincia, generando pérdidas en la producción agrícola-ganadera, cortes en rutas y en inconvenientes en las ciudades más grandes. En el centro-este de Argentina, la precipitación anual aumentó entre un 10% y un 40% entre 1961 y 2016 (SMN, 2018). Esto originó el corrimiento de la frontera agropecuaria, incorporando una gran cantidad de hectáreas a usos agrícolas en la provincia de La Pampa (Barros y Camilloni, 2016) que, cuando no provocó inundaciones, generó incrementos productivos agropecuarios regionales muy importantes.

A pesar de esta tendencia general en la serie pluviométrica, las precipitaciones tienen una variación interanual significativa. De un año a otro puede pasarse de un superávit de lluvias a una sequía, característico de un clima sub-húmedo a semiárido (Bohn *et al.*, 2007). Es justamente por esta variabilidad en el régimen de precipitaciones de la región que se desestabiliza continuamente la producción agrícola-ganadera (Scian, 2003).

El pico máximo de precipitaciones observado entre 1999-2001 en todas las localidades del área, está relacionado con el fenómeno climático de “El Niño” de 1997/1998, considerado uno de los fenómenos más severos de las últimas décadas (Brescia *et al.*, 1998). Este máximo registro de lluvia alcanzó valores que varían entre los 1.235 mm anuales (Ingeniero Foster) y 1.597 mm (Arata), aumentando en sentido creciente de las isohietas de la provincia. Este gran aumento de las precipitaciones observado a mediados del siglo XX se presentó

en todo el cono sur de Sudamérica al este de la Cordillera de los Andes (Castañeda y Barros, 1994; Barros *et al.*, 2008), y es un comportamiento pluviométrico que se produciría como consecuencia del desplazamiento de los anticiclones subtropicales hacia latitudes más altas. En el sur y centro de la Argentina, la fuerte tendencia positiva fue simultánea con el calentamiento de las costas e islas antárticas del hemisferio continental causado posiblemente por el desplazamiento hacia el sur del anticiclón del Atlántico Sur (Camilloni, 2005). Estos efectos repentinos en el clima, principalmente en las precipitaciones y en la temperatura, observados desde la segunda mitad del siglo XX, han sido atribuidos por la comunidad científica al cambio climático (Camilloni, 2018). El efecto invernadero natural del planeta se encuentra afectado por las concentraciones de gases de efecto invernadero producido por actividades antrópicas (IPCC, 2013), lo que genera estos eventos climáticos.

Respecto a la distribución media mensual de las precipitaciones a lo largo del año hidrológico, en todas las localidades el mayor registro de precipitaciones se concentra en la época estival en un 37% superando los 200 mm, descendiendo en las estaciones de primavera y otoño (equinoccios) en un 29% y 26% respectivamente, mientras que en la estación invernal las precipitaciones se vuelven mínimas concentrando sólo el 8% con valores que rondan los 50 mm. A modo gráfico se muestran los hidrogramas de las series pluviométricas correspondientes a las localidades de Ingeniero Foster, Arata, Eduardo Castex y Rucanelo (Figura 15). Los máximos valores medios mensuales registrados a lo largo del año se observan en general, en los meses de marzo y diciembre, mientras que los valores mínimos se encuentran en los meses de junio y julio.



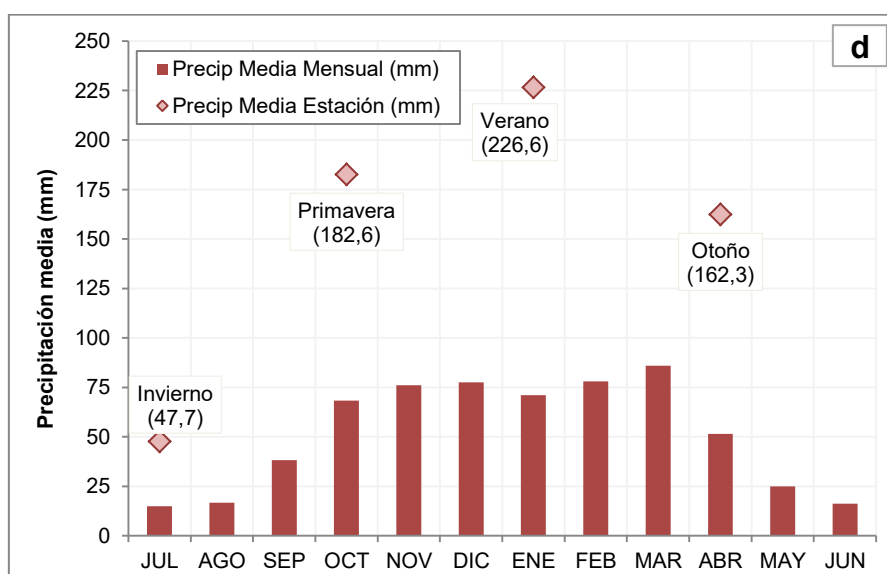
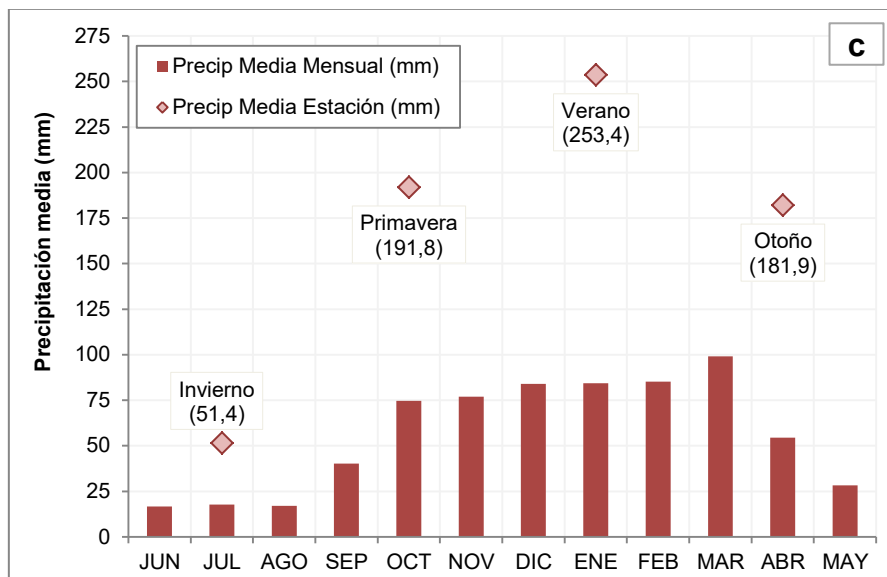
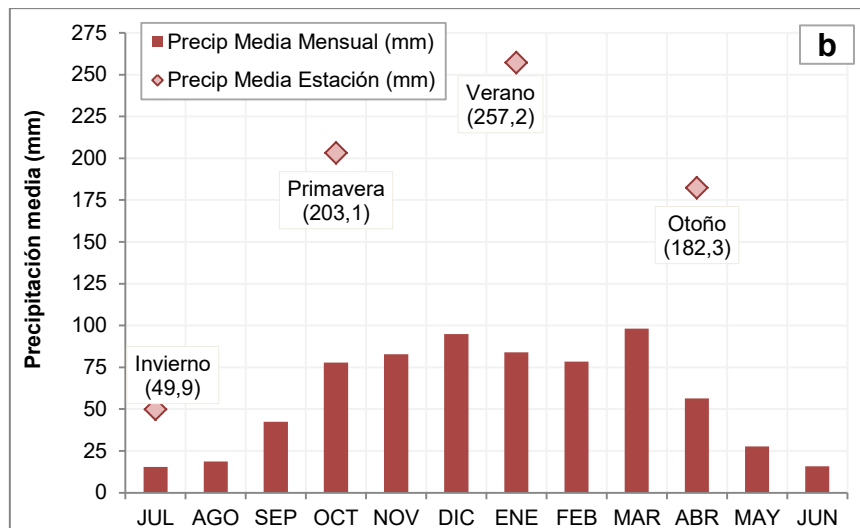


Figura 15. Hidrograma de precipitación media mensual (mm) del período 1928-2019. a) Ingeniero Foster; b) Arata; c) Eduardo Castex; d) Rucanelo.

En la época estival, el ciclón NOA se ubica en latitudes mayores hacia el sur, provocando un mayor ingreso de masas de aires húmedas desde el Océano Atlántico que generan un choque frontal con los vientos fríos y secos que ingresan desde el S-O desde el Océano Pacífico. A causa de esto, las precipitaciones se concentran en esta época. Por el contrario, en invierno, el ciclón NOA se reubica en latitudes menores, impidiendo la entrada de vientos húmedos hacia la provincia (Barros y Perczyk, 2006).

3.4 Temperatura

El análisis de la distribución mensual de la temperatura se realizó a partir de los datos meteorológicos de la estación “Don Osvaldo” para el período 1998-2019 (Figura 16). La media anual para el período completo es de 15,4°C, siendo enero el mes más cálido con un valor de temperatura media de 23,1°C, y julio el mes más frío presentando una media de 6,9°C. Existe un aumento gradual de la temperatura hacia los meses estivales, volviendo a disminuir en los meses invernales. Los valores absolutos de temperatura máxima más elevados registrados en el período analizado rondan los 40°C y pueden ocurrir durante los meses de octubre a marzo. Mientras que los valores mínimos o heladas pueden ocurrir desde el mes de abril a noviembre. Esta variación anual de la temperatura es consecuencia de la variación en la incidencia de la radiación solar en latitudes altas, debido a distintos factores astronómicos, lo que provoca una clara distinción entre las distintas estaciones.

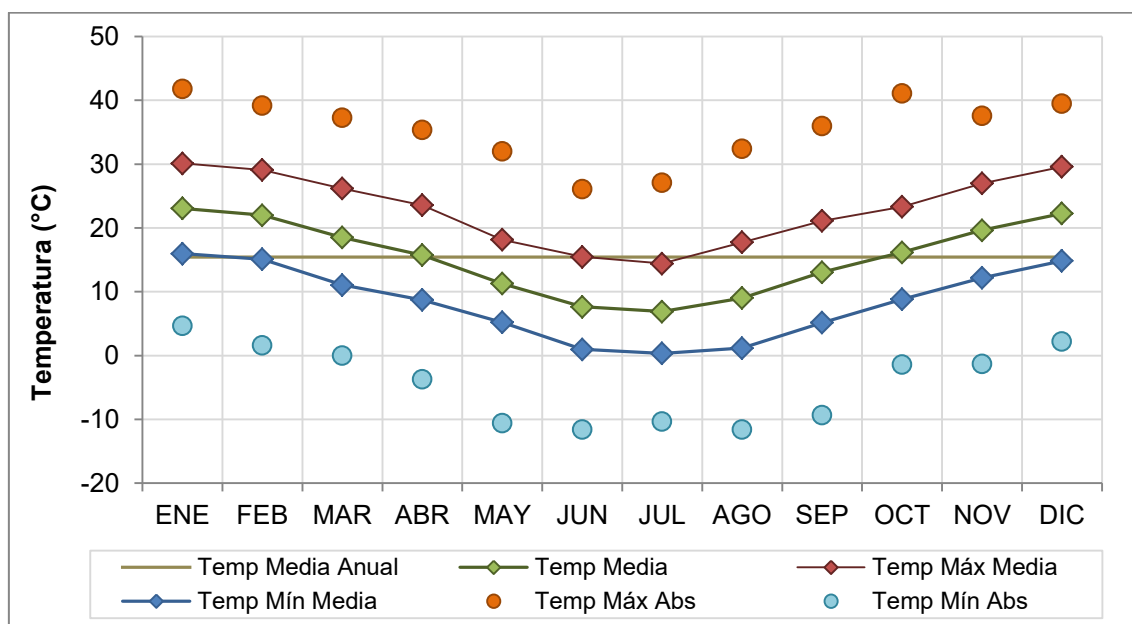


Figura 16. Variación de la temperatura mensual del período 1998-2019 a partir de los datos provenientes de la estación “Don Osvaldo”.

En la variación de la temperatura de carácter anual para el período 1998-2019 (Figura 17), se observa una línea de tendencia positiva, cuyo aumento se manifiesta marcadamente a partir del año 2006, alcanzando en el 2015 un pico

de 16,3°C de media anual. El efecto positivo en la temperatura según Camilioni (2018) es una consecuencia del calentamiento de la atmósfera global debido al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la misma, y también detectó en el centro-norte del país un aumento de la temperatura media en 0,5°C entre 1960-2010. A partir del año 2016 los valores de temperatura media anual se mantuvieron cercanos a la media.

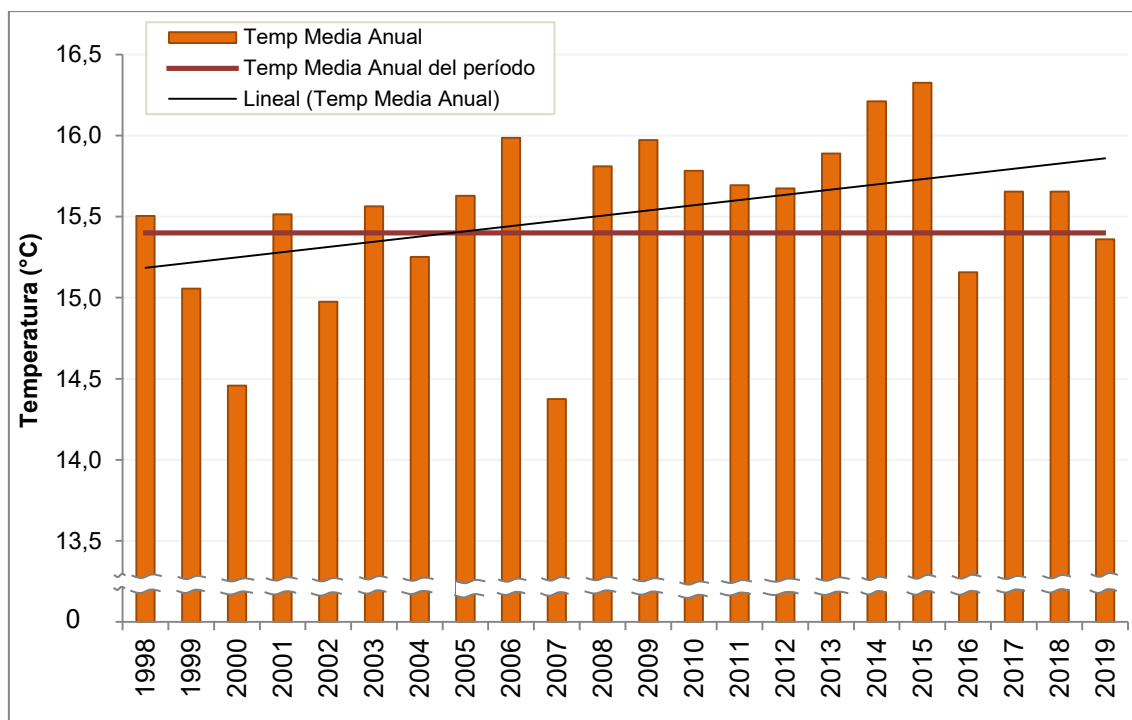


Figura 17. Variación de la temperatura anual del período 1998-2019 a partir de los datos provenientes de la estación “Don Osvaldo”.

3.5 Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial (ETP) según Thornthwaite (1948) es aquella que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuviera en condiciones óptimas, mientras que la evapotranspiración de referencia (ET_o) se produciría en una superficie cubierta con un cultivo hipotético uniforme en altura, corto y bien regado, con óptimas condiciones hídricas y con determinadas características aerodinámicas y de albedo. En hidrología al considerar la evapotranspiración (ET) dentro de un balance hídrico, ambos conceptos son considerados intercambiables. A partir de los datos de la estación meteorológica “Don Osvaldo” se calcularon los valores de ET_o utilizando el software ET_o Calculator v3.2, desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO (2012) que utiliza la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y la ETP con el método propuesto por Thornthwaite y Mather (1955) detallado en la Tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP) según método de Thornthwaite y Mather (1955).

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Temp. Media Mensual (°C)	23,1	22,0	18,5	15,8	11,3	7,7	6,9	9,0	13,1	16,2	19,6	22,3	15,5
Índice de Calor Mensual	10,1	9,4	7,3	5,7	3,4	1,9	1,6	2,5	4,3	5,9	7,9	9,6	69,6
ETP sin ajustar (mm)	108,1	100,2	76,1	58,8	34,5	18,6	15,7	24,2	43,7	61,3	83,6	102,1	
Factor de Ajuste	1,2	1,0	1,1	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	
ETP ajustada (mm)	133,4	104,2	80,6	55,3	30,5	15,2	13,6	22,8	43,7	69,3	97,8	128,1	794,5

En la Figura 18 se detallan los resultados comparables de ETP teniendo en cuenta ambos métodos. En general, coincidente con los valores altos de temperatura, los meses estivales corresponden a los de mayor evapotranspiración, mientras que los invernales registran los menores valores. Si se comparan ambos métodos, se observa que los resultados por Penman-Monteith son mayores a los obtenidos por el método de Thornthwaite. El método de Penman-Monteith es un modelo aerodinámico completo, que integra el cálculo de todas las variables que intervienen en la ETo incluyendo velocidad del viento, humedad relativa, presión de vapor, temperatura, entre otras, presentando una alta correlación con lisímetros tanto en zonas áridas, húmedas y templadas (Allen *et al.*, 1990). Se puede considerar entonces que el método de Thornthwaite puede estar subestimando los resultados de ETP en la zona, dado que sólo considera la temperatura del área, corregida en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes.

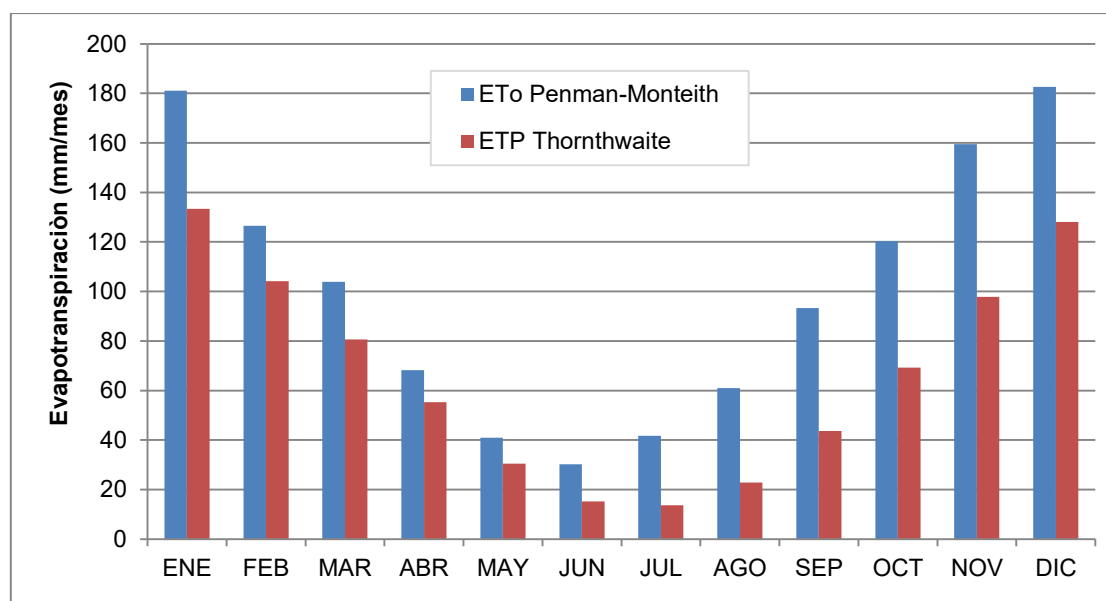


Figura 18. Valores de ETo según método de Penman Monteith y ETP según Thornthwaite, a partir de los datos de la Estación Meteorológica "Don Osvaldo".

En la Figura 19, se observa la variación temporal de los resultados mensuales de ETP para el período analizado 1998-2019, a partir del cual se detecta a través de una línea de tendencia, un leve incremento de la evapotranspiración en el tiempo. Esto es coincidente con la variación de la temperatura para el mismo período, considerando que es uno de los factores más importantes dentro del cálculo de ETP.

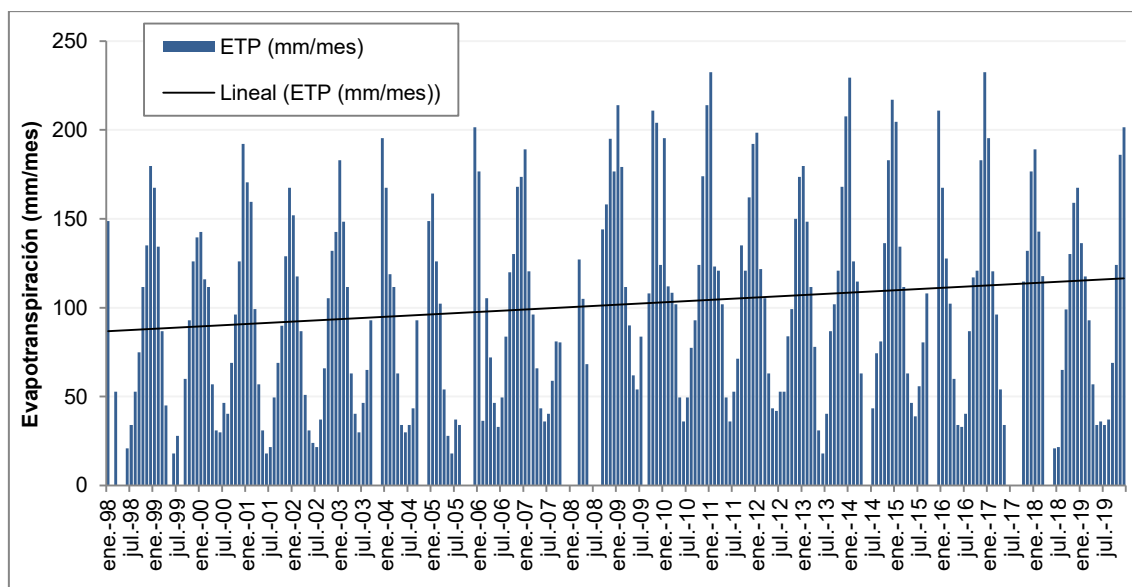


Figura 19. Variación de la ETo mensual del período 1998-2019 calculada con el método de Penman-Motheith a partir de los datos provenientes de la estación “Don Osvaldo”.

3.6 Humedad Relativa

La distribución de la humedad relativa de manera temporal fue analizada a partir de datos de la estación meteorológica “Don Osvaldo” para el período 1998-2017. La humedad relativa media obtenida es de 74%, valor representativo de la región subhúmeda seca que alcanza el este de la provincia (Clima Pampeano), por incidencia de los vientos del Atlántico. Según Cano *et al.* (1980) la localidad de General Pico, incluida dentro de esta región, presenta valores de humedad relativa media anual de 68%, y que, hacia el oeste de la provincia disminuye notoriamente.

Respecto a la variación mensual de la humedad relativa (Figura 20) se observa que los mayores valores se registran en los meses de junio y julio del período invernal (83%), mientras el menor valor se destaca en el mes estival de diciembre (66%). Esto es debido a la disminución y aumento de la temperatura en invierno y verano respectivamente, ya que cuanto más temperatura tenga una masa de aire, mayor es el vapor de agua que puede contener, volviéndose el aire más seco.

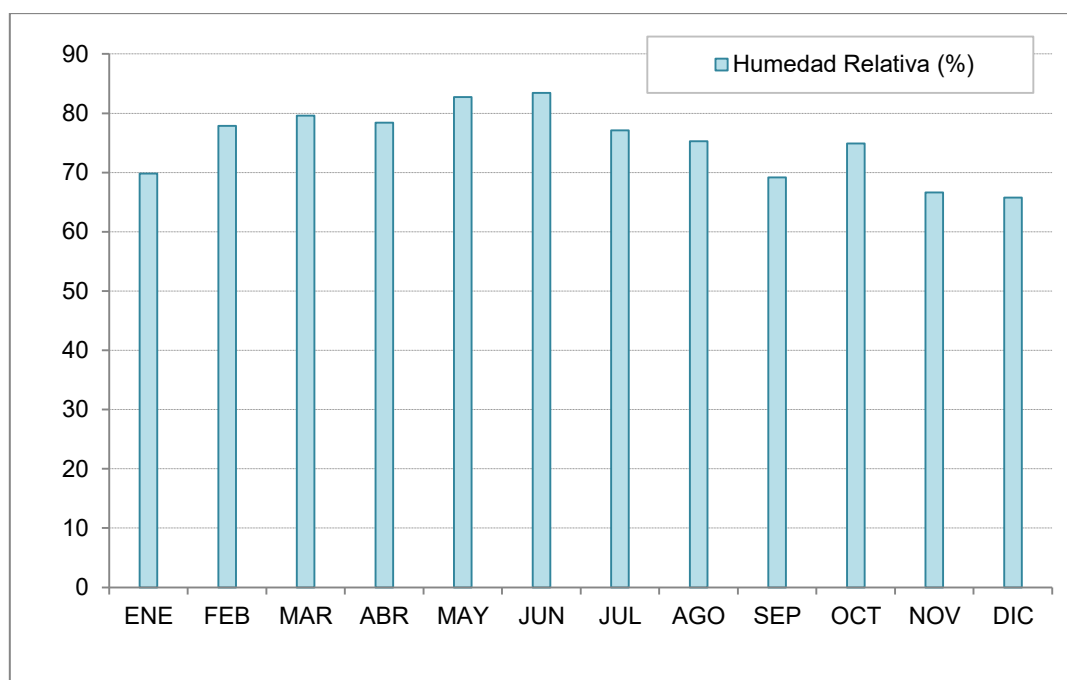


Figura 20. Variación mensual de la humedad relativa (%) correspondiente al período 1998-2017 a partir de los datos de la estación meteorológica “Don Osvaldo”.

3.7 Vientos

A partir de los datos provenientes de la estación “Don Osvaldo”, se realizó una rosa de los vientos correspondiente al período 1998-2017, teniendo en cuenta la velocidad del viento y la frecuencia de la dirección (Figura 21). Se observa que la dirección del viento más frecuente proviene desde el N y NE, hecho que ocurre por la incidencia de las masas de aire provenientes del Atlántico; y de manera secundaria dominan los vientos del S, provenientes del anticiclón del Pacífico. Las velocidades de vientos más frecuentes alcanzan los 20 km/h, mientras que velocidades mayores a los 30 km/h no logran diferenciarse en el gráfico comparativo al descender su frecuencia.

Los valores correspondientes al período analizado, 1998-2017, presentan una velocidad media anual de unos 6,1 km/h, siendo los meses de primavera y verano los que poseen una mayor media mensual durante el año (Figura 22) con valores que alcanzan los 7,8 km/h en el mes de septiembre y octubre.

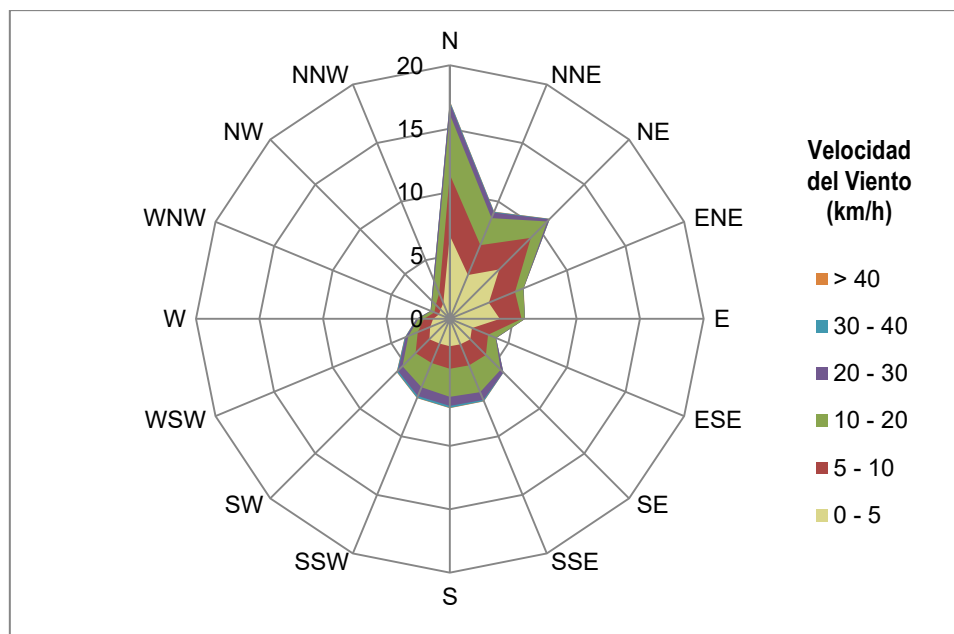


Figura 21. Frecuencia acumulada de la dirección predominante del viento a distintas velocidades (km/h).

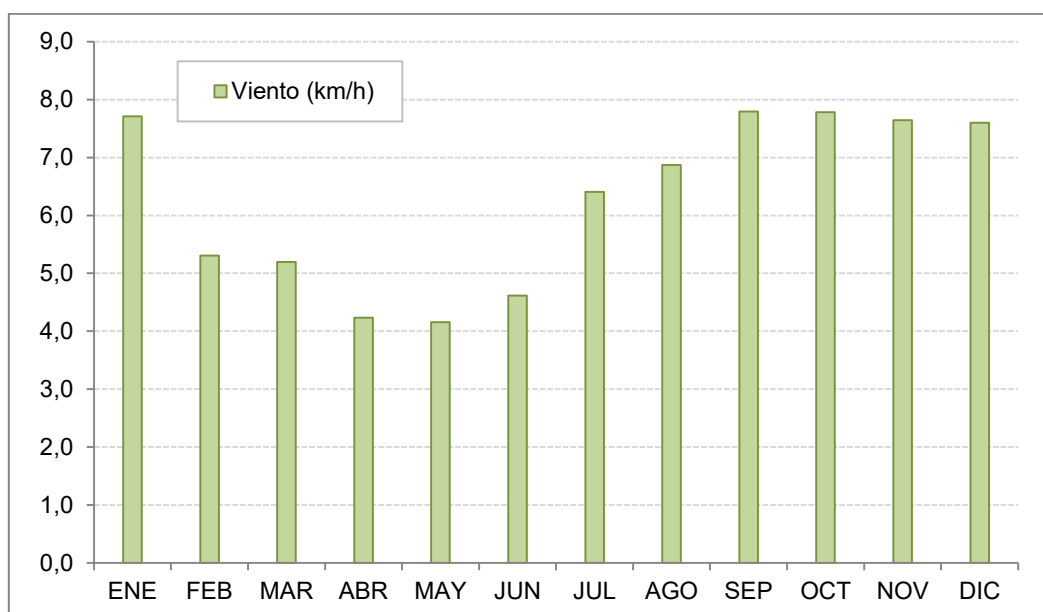


Figura 22. Velocidad del viento media mensual para el período 1998-2017.

3.8 Balance Hídrico

Se efectuó el balance hídrico utilizando la metodología de Thornthwaite y Mather (1955). Este tipo de balance se establece a partir de la oferta de agua por precipitaciones, la demanda atmosférica de agua por la evapotranspiración y el almacenaje de agua en el suelo a partir del cálculo de la Reserva de Agua Útil (RAU). Se utilizaron las precipitaciones mensuales del período 1998-2018 de la localidad de Arata y la ETP mensual obtenida con los datos de la estación meteorológica “Don Osvaldo” para el mismo período (Tabla 3). Los parámetros edáficos como la Capacidad de Campo (CC), el Punto de Marchitez

Permanente (PMP) y la densidad aparente para el cálculo de la RAU, al igual que el espesor del suelo, fueron calculados a partir de datos extraídos del Inventario Integrado de Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa (Cano *et al.*, 1980), obteniendo una RAU de 68 mm.

Con una precipitación media anual para el período correspondiente de 813 mm y una evapotranspiración potencial (ETP) anual de 795 mm, se obtiene a partir del balance, una evapotranspiración real (ETR) de 772 mm. En la Figura 23 se observa el balance hídrico obtenido con los datos mensuales de precipitación, ETP y ETR. En época invernal, considerando una RAU completa de 68 mm, se observa un período de utilización de la reserva que se recupera rápidamente en primavera, generando posibles excesos hídricos que alcanzarían los 42 mm. Al comienzo de los meses estivales la ETP supera notablemente a las precipitaciones y comienza a utilizar agua de la RAU, para en diciembre entrar en un déficit hídrico de aproximadamente 23 mm. A partir de los meses de otoño, las precipitaciones superan la evapotranspiración, lo que resulta en un comienzo de recuperación de la RAU hasta la época invernal.

Según los cálculos realizados, se registran excesos hídricos principalmente en los meses de primavera, por lo que habría disponibilidad de agua tanto para escurrimiento superficial como para recarga del acuífero. En los meses de otoño, las precipitaciones aumentan notoriamente, lo que también permitiría un posible excedente hídrico si la situación de la RAU fuera óptima.

Tabla 3. Balance Hídrico de Thornthwaite y Mather (1955) para la localidad de Arata para el período 1998-2018.

Mes	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	TOTAL
P (mm)	11,4	12,5	17,5	51,0	113,0	83,2	103,1	81,4	109,2	121,6	81,1	28,7	813,7
ETP (mm)	16,2	14,8	22,7	41,5	67,6	96,9	126,1	136,5	104,0	86,2	53,6	29,8	795,9
ΔRAU	-4,8	-2,3	-5,2	9,5	2,8	-13,7	-23	-31,3	5,3	35,4	27,6	-1,2	
RAU (68 mm)	63,2	60,9	55,7	65,2	68	54,3	31,3	0	5,3	40,7	68,3	67,1	
ETR (mm)	16,2	14,8	22,7	41,5	67,6	96,9	126,1	112,7	104	86,2	53,6	29,8	772,1
Déficit (mm)								23,8					23,8
Excesos (mm)					42,6								42,6

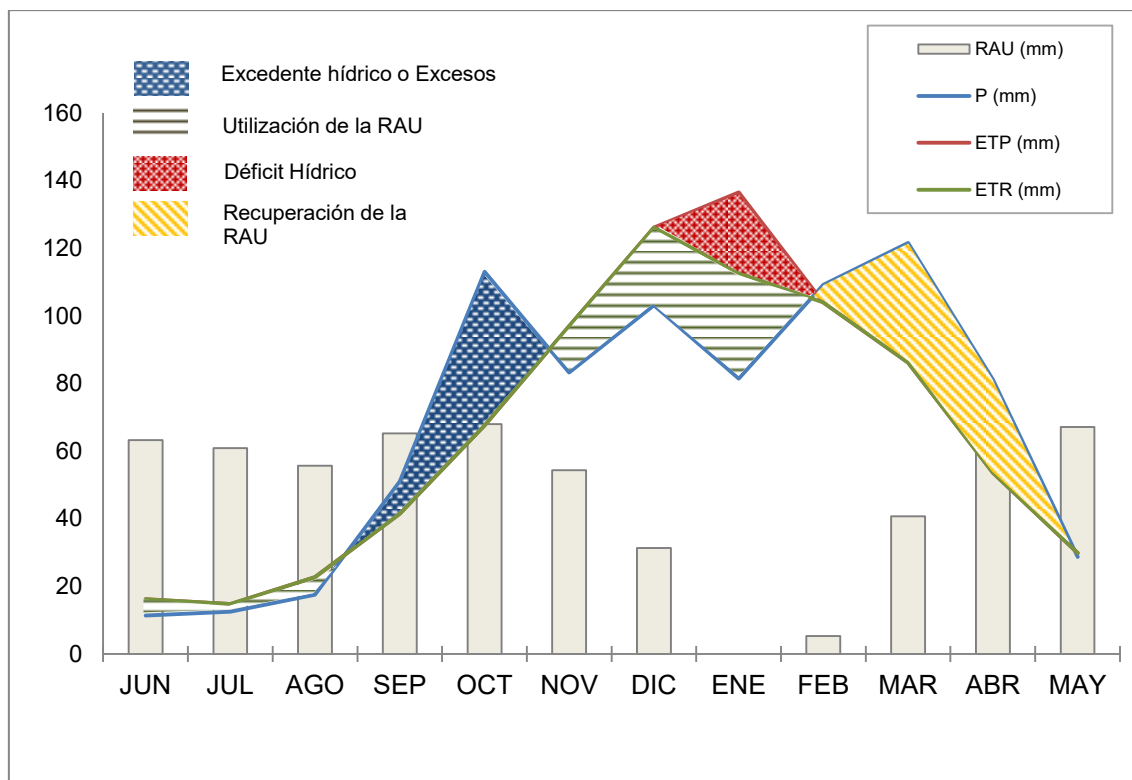


Figura 23. Balance Hídrico de la localidad de Arata para el período 1998-2018.

4 GEOLOGÍA

4.1 Marco Geológico Regional

El territorio argentino se encuentra dividido en diversas provincias geológicas, las cuales presentan una determinada sucesión estratigráfica, características estructurales y geomorfológicas propias, como producto de una misma historia geológica (Rolleri, 1976). De acuerdo a la clasificación propuesta por Ramos (1999a), el área de estudio se emplaza dentro de la “Llanura Chacabonaerense” (Figura 24) o denominada anteriormente por Russo *et al.* (1979) como “Llanura Chaco Pampeana”. Es una extensa región que abarca desde la frontera con los países limítrofes Bolivia y Paraguay al norte, hasta aproximadamente el río Colorado al sur, hundiéndose en la plataforma continental, y desde las orogenias pertenecientes a las Sierras Subandinas y Sierras Pampeanas al oeste hasta el río Paraná al este.

El inicio de formación de esta llanura, está relacionado con ciclos orogénicos de gran importancia y más antiguos del territorio argentino, que formaron cadenas montañosas que pueden apreciarse dentro de esta extensa llanura.

A partir de afloramientos de granitoides en la Cantera de Lonco Vaca en el norte de la provincia de La Pampa y en proximidades al cauce del río Colorado al sur, Llambías (1975) y Linares *et al.* (1980) determinaron que el basamento cristalino de La Pampa representa la parte sur de las Sierras Pampeanas Orientales. Este orógeno asociado a la subducción corresponde al Ciclo Pampeano, al Proterozoico superior a Cámbrico inferior, y culmina con rocas graníticas sin y poscolisionales del Cámbrico inferior, que luego son intruidas por rocas riolíticas en el Cámbrico superior, lo que indicaría la exhumación del orógeno. La naturaleza calcoalcalina y complejos ofiolíticos en el terreno de Pampia y el de Córdoba de estas rocas, confirmaron su origen asociado a procesos de subducción, lo que indicaría un cierre de cuencas oceánicas (Ramos, 1999b).

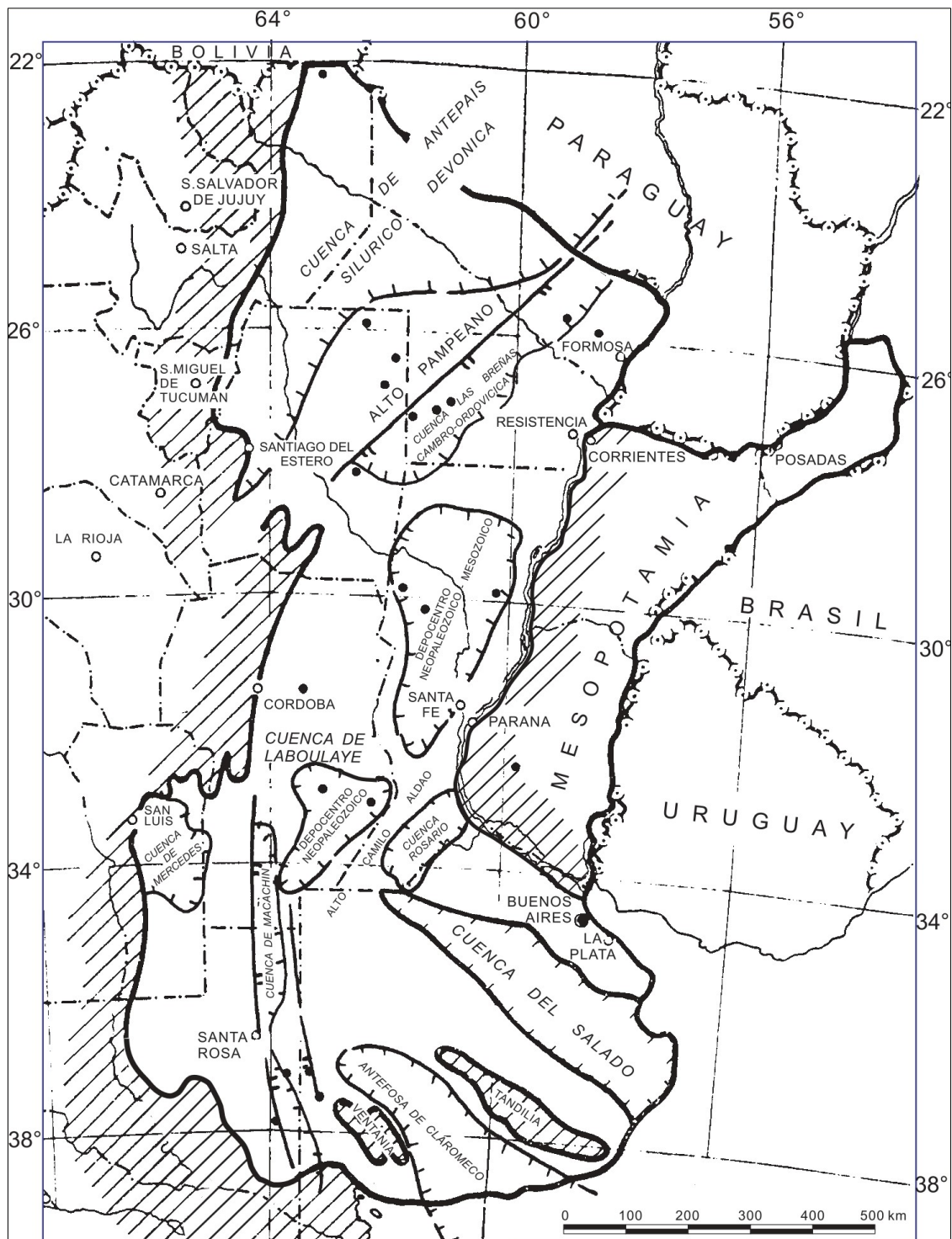


Figura 24. Provincia geológica "Llanura Chacabonaerense" y sus principales depocentros y cuencas sedimentarias. Tomado de Ramos (1999a).

Posterior a este evento de subducción de gran importancia que origina gran parte del basamento de la provincia de La Pampa, ocurrieron diversos ciclos orogénicos. Durante el Cámbrico medio al Devónico superior, el margen occidental del continente se encontró en un contexto de subducción denominado Ciclo Famatiano, lo que produjo el desarrollo de arcos magmáticos y cuencas marinas ocupando una región desde la Puna hasta la

Patagonia, afectando la provincia de La Pampa (Tickyj *et al.* 1999a y 1999b). Uno de los eventos es la colisión de Cuyania con el terreno de Pampia, que a partir de evidencias geofísicas, Chernicoff y Zappettini (2004), precisaron los límites de estos terrenos en el oeste y suroeste de La Pampa, incluyendo también el de Chilenia, Patagonia y del Cratón del Río de La Plata (Figura 25).

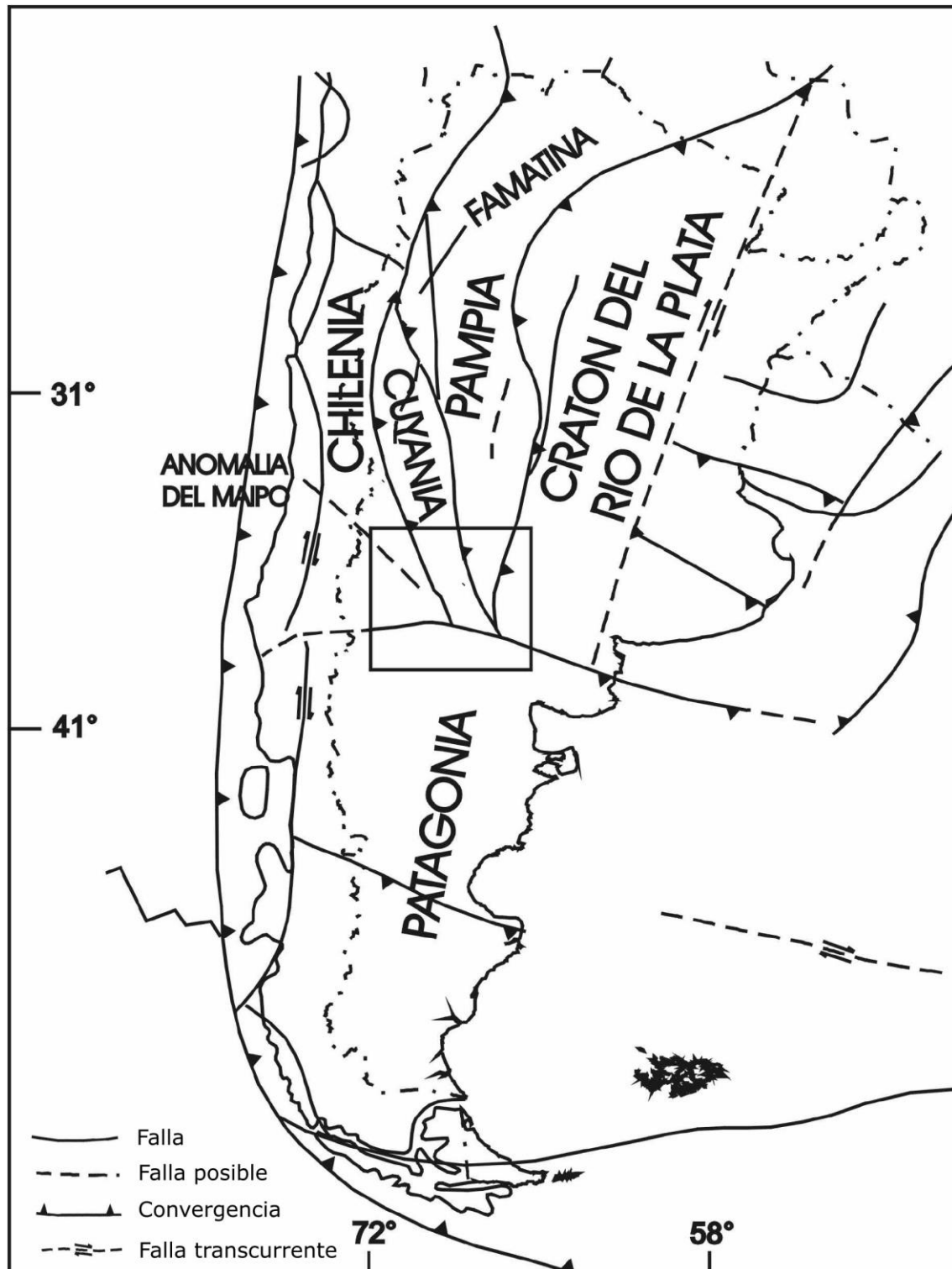


Figura 25. Delimitación de terrenos acrecionados en la región austral tomado de Chernicoff y Zappettini (2004).

Durante el Pérmico al Triásico, surge un orógeno de tipo andino sobre la zona cordillerana perteneciente al ciclo Gondwánico, y que debido posiblemente a una disminución de la velocidad de subducción generó un régimen extensional generalizado, llevando al desarrollo de numerosas cuencas de retroarco a lo largo del margen pacífico y cuencas extensionales o trastensionales en la región cratónica interna (Ramos 1999b), entre ellas una de las cuencas de mayor importancia en la Llanura Chacobonaerense, denominada Cuenca Chacoparanaense.

Entre el Triásico medio al Cretácico medio, ocurre un ciclo extensional durante el Ciclo Patagónico que en consecuencia, se genera una zona de ruptura sobre el margen occidental del cratón del Río de La Plata, conocido como el sistema de rift pampeano central (De Elorriaga, 2010) (Figura 26). Este sistema de rifts se propaga hasta el noroeste argentino, y se encuentra estrechamente ligado con la apertura del Atlántico Sur entre el Jurásico y Cretácico como consecuencia de la fragmentación de Gondwana (De Elorriaga, 2010). Como consecuencia se generan depocentros estrechos pero profundos, conformados por depósitos continentales y marinos (Ramos, 1999b), entre ellos se encuentran los de Macachín, Laboulaye y General Lavalle que abarcan la provincia de La Pampa; y entre otros numerosos en el resto de la Llanura Chacobonaerense.

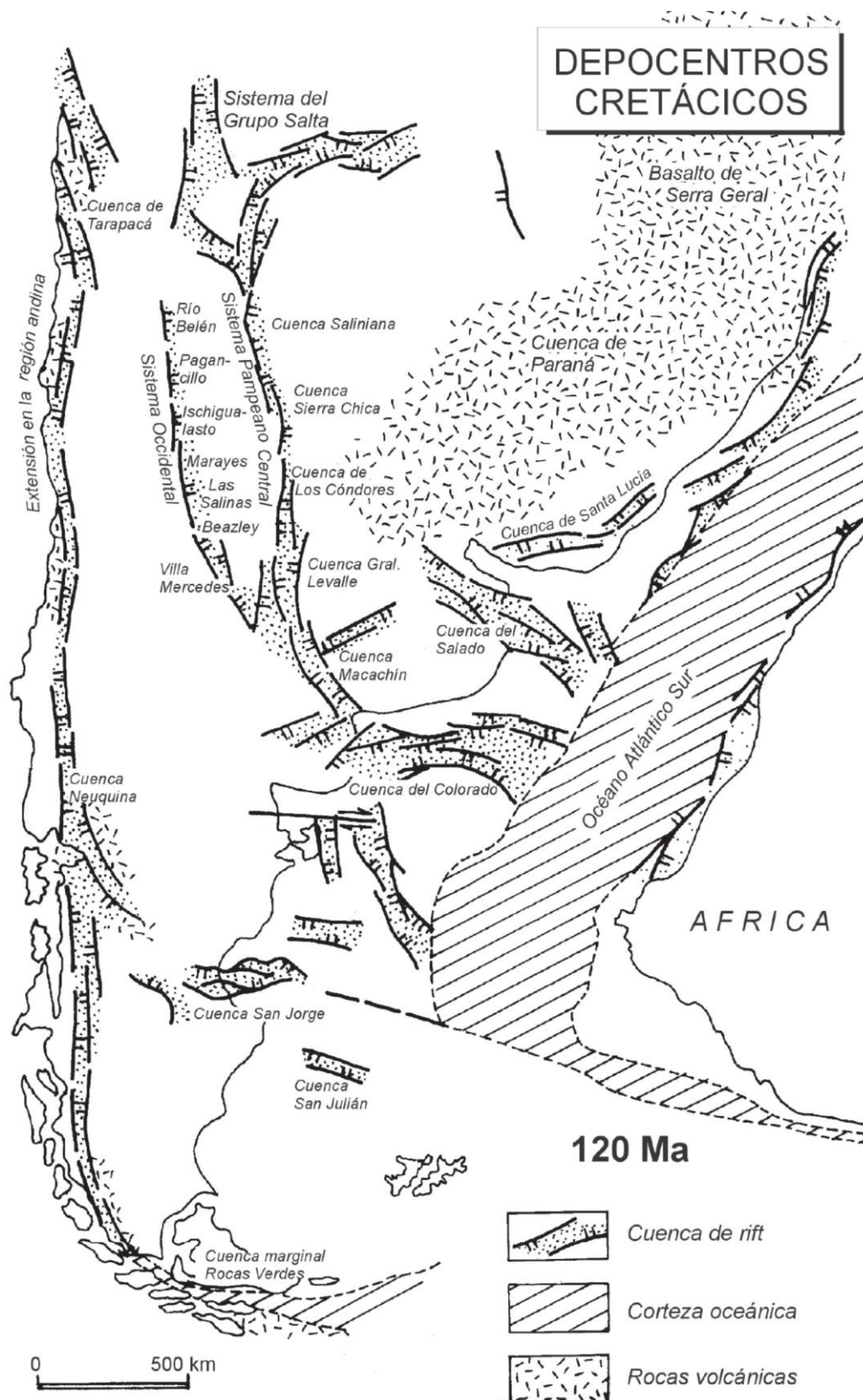


Figura 26. Sistemas extensionales desarrollados durante el Cretácico inferior. Sistema de rift pampeano central. Tomado de Ramos (1999b).

En el Cenozoico durante el Ciclo Ándico, como resultado de la subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa continental de Sudamérica (Ramos, 1999b) en una dirección general ENE-OSO, surge el desarrollo de importantes deformaciones como la Cordillera de los Andes, y la reactivación de las Sierras Subandinas y Pampeanas por fallamiento compresional, y cuencas marino continentales en el borde del continente.

En el Paleoceno inferior y medio predominan transgresiones marinas provenientes desde el Atlántico, mientras que el Paleoceno superior-Eoceno se caracterizó por el desarrollo de una condición más bien erosiva. Un hundimiento máximo ocurre en el Mioceno a partir del segundo movimiento andino, que reactiva la subsidencia de la Cuenca Macachín. Una transgresión marina depositó los sedimentos de la Formación Macachín desde fin del Oligoceno hasta el Mioceno medio/superior (Yrigoyen, 1975).

En la Llanura Chacabonaerense, en el Mioceno medio – tardío, se desarrolla una extensa transgresión marina, mar conocido como Paranaense (Visconti, 2007), que genera la colmatación de la Cuenca Chacoparanaense. Este mar abarcó hasta el sur de las provincias de La Pampa y Buenos Aires, y el noroeste de Río Negro (Figura 27).

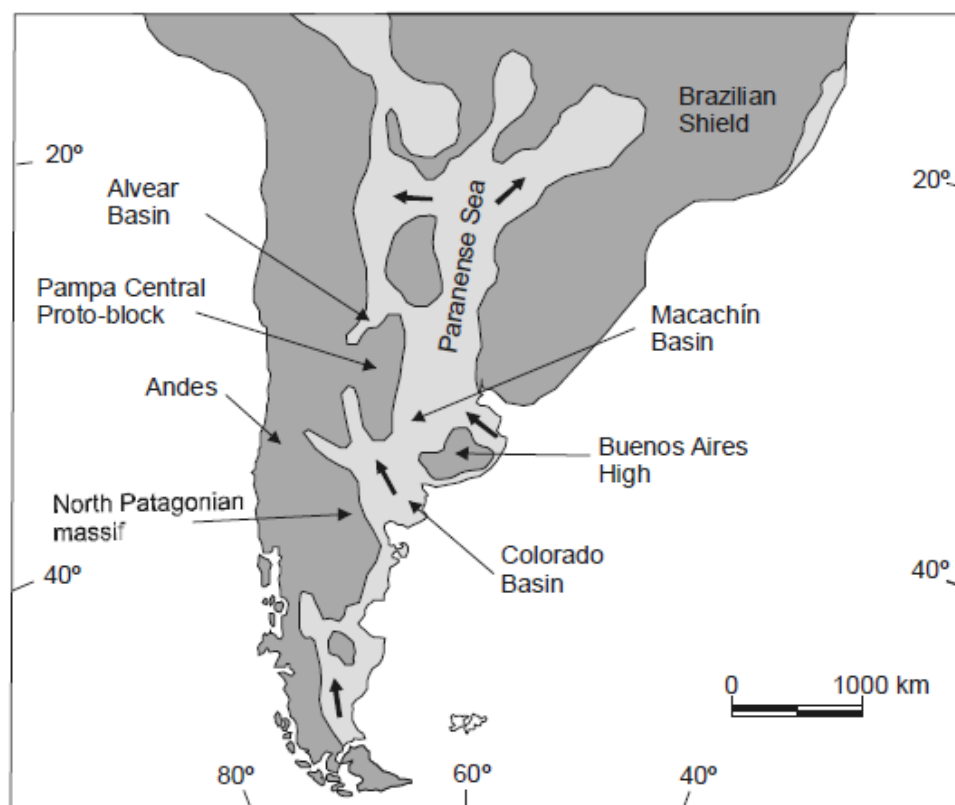


Figura 27. Mapa ilustrativo del área cubierta por el Mar Paranaense durante el Mioceno medio. Tomado de Folguera y Zarate (2011).

Posterior al retiro del Mar Paranaense, surge un ciclo de sedimentación de depósitos de materiales provenientes del continente, con facies fluviales, de abanico aluviales y de evaporitas, durante el Mioceno tardío. Estos sedimentos en La Pampa corresponden a la Formación Barranca Final (Visconti *et al.*, 2003), sobre la cual se depositó posteriormente la Formación Río Negro, mediante una discordancia erosiva (Folguera y Zárate, 2009), y por encima la Formación Cerro Azul (Visconti *et al.*, 2007) asignada al Mioceno tardío. Esta última ocupa gran parte del terreno de la provincia de La Pampa y está formada por limos, limos arenosos y arenas muy finas limosas, de color castaño rojizo, con nódulos carbonáticos muy frecuentes y, hacia el techo, los sedimentos están fuertemente cementados por carbonato de calcio, rematando en una costra de tosca de más de 1 m de potencia (Folguera y Zárate, 2009), aunque Vogt *et al.* (1999) mostraron que la relación es discordante entre los depósitos de la Formación Cerro Azul y la costra de tosca e involucra un hiato.

Durante el Plioceno se establece un régimen continental con predominio de erosión. Debido al ascenso de la Cordillera de los Andes, fueron depositados en la llanura sedimentos limo loésicos que alcanzaron hasta la plataforma y talud continental. Finalmente, durante el Pleistoceno y Holoceno se depositaron en la llanura un delgado manto de limos arenosos de origen eólico de importantes espesores (Folguera y Zárate, 2009).

4.2 Marco Geológico Local

La geología estructural y estratigrafía de la provincia de La Pampa se encuentran escasamente estudiadas, ya que el conocimiento del subsuelo está restringido a exploraciones geofísicas y perforaciones profundas que se concentraban en la búsqueda de posibilidades petroleras o de agua subterránea. El relieve de la provincia es muy suave y la amplia cobertura sedimentaria neógena impiden la identificación de rocas antiguas y sus estructuras (Kostadinoff *et al.* 2001).

Durante principios del siglo XX se realizaron varias perforaciones profundas por la Dirección Nacional de Geología y Minería (DNGM) dentro del marco de una exploración petrolera, a partir de las cuales se revelaron la presencia de cuencas (como la Cuenca de Macachín), y estructuras de bloques. La Administración Provincial del Agua (APA), también continua explorando el subsuelo desde la década del '60, mediante numerosas perforaciones, con el objetivo de explotar acuíferos portadores de agua dulce (Kostadinoff y Llambás, 2002). Si bien las perforaciones eran de escasa profundidad, algunas alcanzaban el basamento, aportando información para efectuar una correlación.

4.2.1 Sistema de Estructuras

Salso (1966) describe el este de la provincia de La Pampa y lo asocia principalmente a la cuenca de Macachín, proponiendo su ubicación a partir de datos geofísicos de sísmica de refracción y de las perforaciones profundas de la DNGM mencionadas anteriormente (Figura 28). La describe como un ambiente de depositación anterior al Terciario que fue formada por hundimientos diferenciales de los bloques del basamento cristalino. Según este autor, la cuenca alcanzaría hasta el área de estudio al noreste. En la zona de la localidad de La Maruja interpreta la presencia de una falla de rumbo NO-SE que se mantiene hasta la altura de la localidad de Conhelo, determinada a través de la profundidad del basamento en La Maruja y la Escuela de Loboco (o Mansilla) (708 m y 43 m respectivamente), con un rechazo de aproximadamente 660 m. Esto representaría el límite occidental de la cuenca.

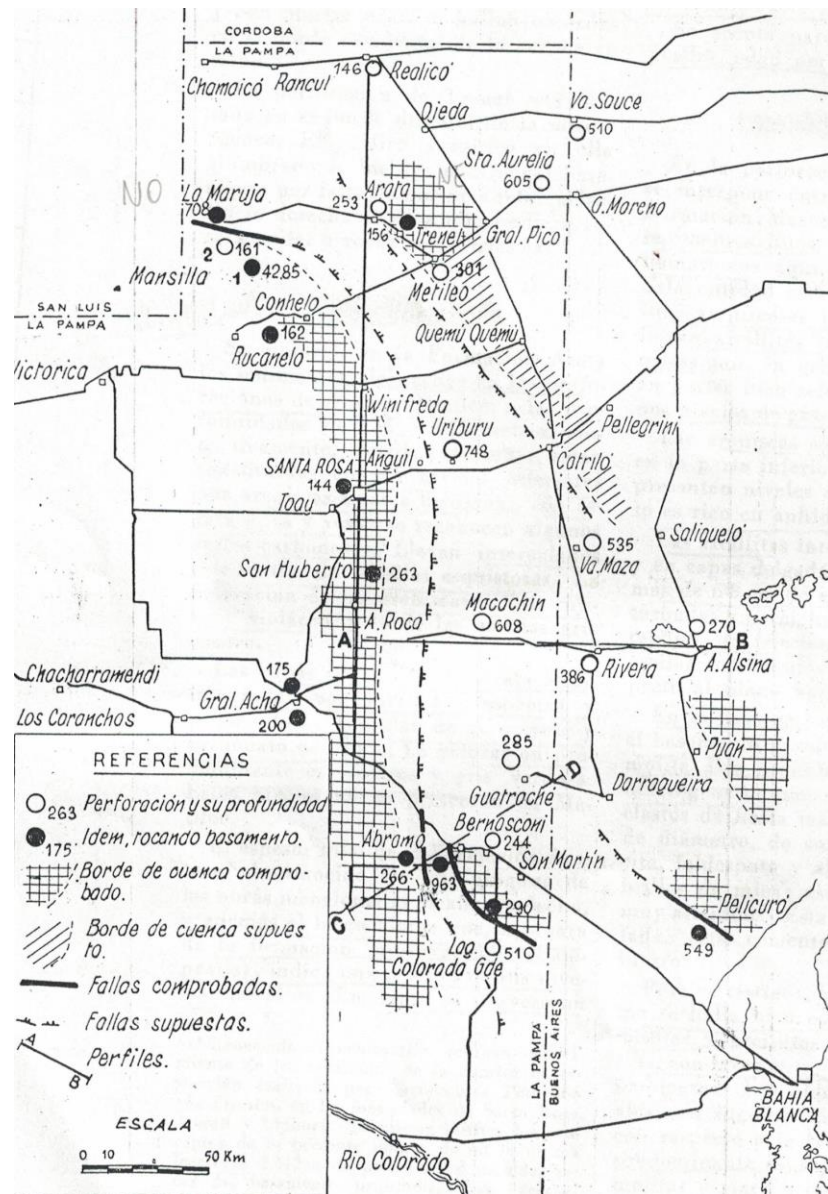


Figura 28. Límites estructurales de la Cuenca de Macachín según Salso (1966).

Posteriormente, Kostadinoff y Llambías (2002) a partir de un relevamiento gravimétrico realizado en la provincia, obtuvieron una propuesta más precisa de los límites de las cuencas sedimentarias, ubicando la cuenca de Macachín al este de la provincia, sin alcanzar el área de estudio como postulaba Salso (1966). Esta cuenca intracratónica se origina según Irigoyen (1975) por un rift de falla transcurrente y de edad cretácica, mientras que De Elorriaga y Camilletti (1999) lo consideraron un hemigraben en el segmento norte, generado por esfuerzos tensionales este-oeste y posterior inversión de la estructura por compresión generada por la tectónica andina que afectó hasta el Mioceno inferior.

Hacia el centro de la provincia se encuentra la cuenca de Quehué (Kostadinoff *et al.*, 2001), donde Kostadinoff y Llambías (2002) indicaron la presencia de fallas de alto ángulo y de gran desarrollo longitudinal. Esta cuenca tiene un lineamiento NO-SE, y abarca unos 15 km de ancho y 250 km de longitud, lo que puede asociarse a una cuenca de rift, con un espesor estimado de 4.900 m. Se estima de edad triásica o cretácica por su cercanía a la cuenca de Macachín, y por sedimentitas descriptas por Casadío *et al.* (2000) en el sureste de la provincia. En el extremo norte de la cuenca de Quehué, Kostadinoff y Llambías (2002) hallaron anomalías gravimétricas negativas, por lo que interpretaron que aparentemente conecta con el extremo sur de la extensión de la cuenca de Laboulaye (Figura 29), que fue asignada al Triásico superior y también presenta una estructura tipo rift intracratónica (Zambrano, 1974), favoreciendo la hipótesis de correlación con la cuenca de Quehué. Esta extensión de la cuenca de Laboulaye abarca desde la localidad de Winifreda al sur hasta la localidad de Ingeniero Luiggi al norte, con un ancho aproximado de 25 km., abarcando el este del área de estudio (Figura 30).

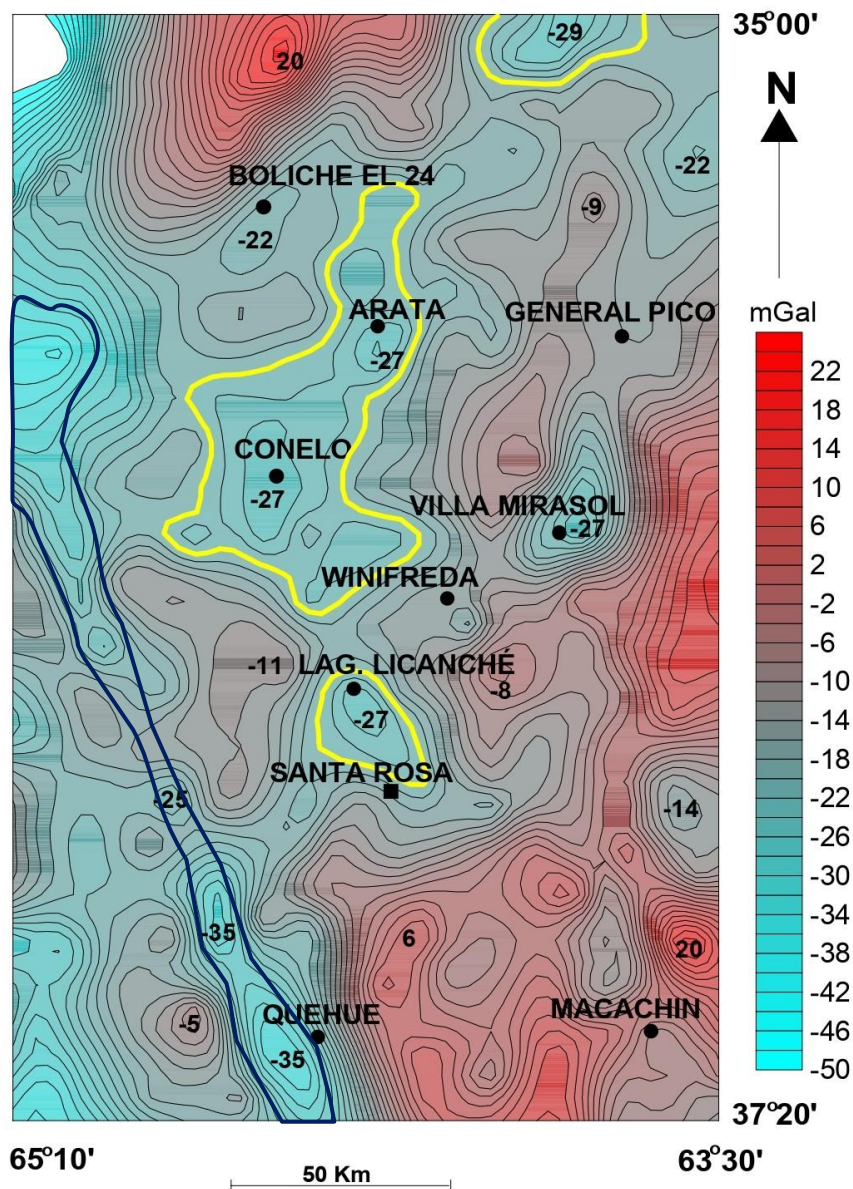


Figura 29. Conexión probable entre la cuenca de Quehué (azul) y la extensión probable de la cuenca de Laboulaye (amarillo) a partir de anomalías gravimétricas de Bourguer. Isótopos de anomalías gravimétricas cada 1 mGal. Tomado de Kostadinoff y Llambías (2002).

En conclusión, se puede conectar el extremo sur de la cuenca de Laboulaye con la parte norte de la de Quehué y posiblemente con la zona norte de la cuenca de Macachín (Kostadinoff y Llambías, 2002 y De Elorriaga *et al.*, 2013) (Figura 30). Se podría considerar que conforman una serie de rifts continentales asimétricos, cuyo disparador fue generado por la ruptura de Gondwana en el Mesozoico, y su dificultad de extensión probablemente debió al endurecimiento de la litosfera como resultado de los reiterados episodios de deformación y el engrosamiento cortical (Barredo y Stinco, 2010).

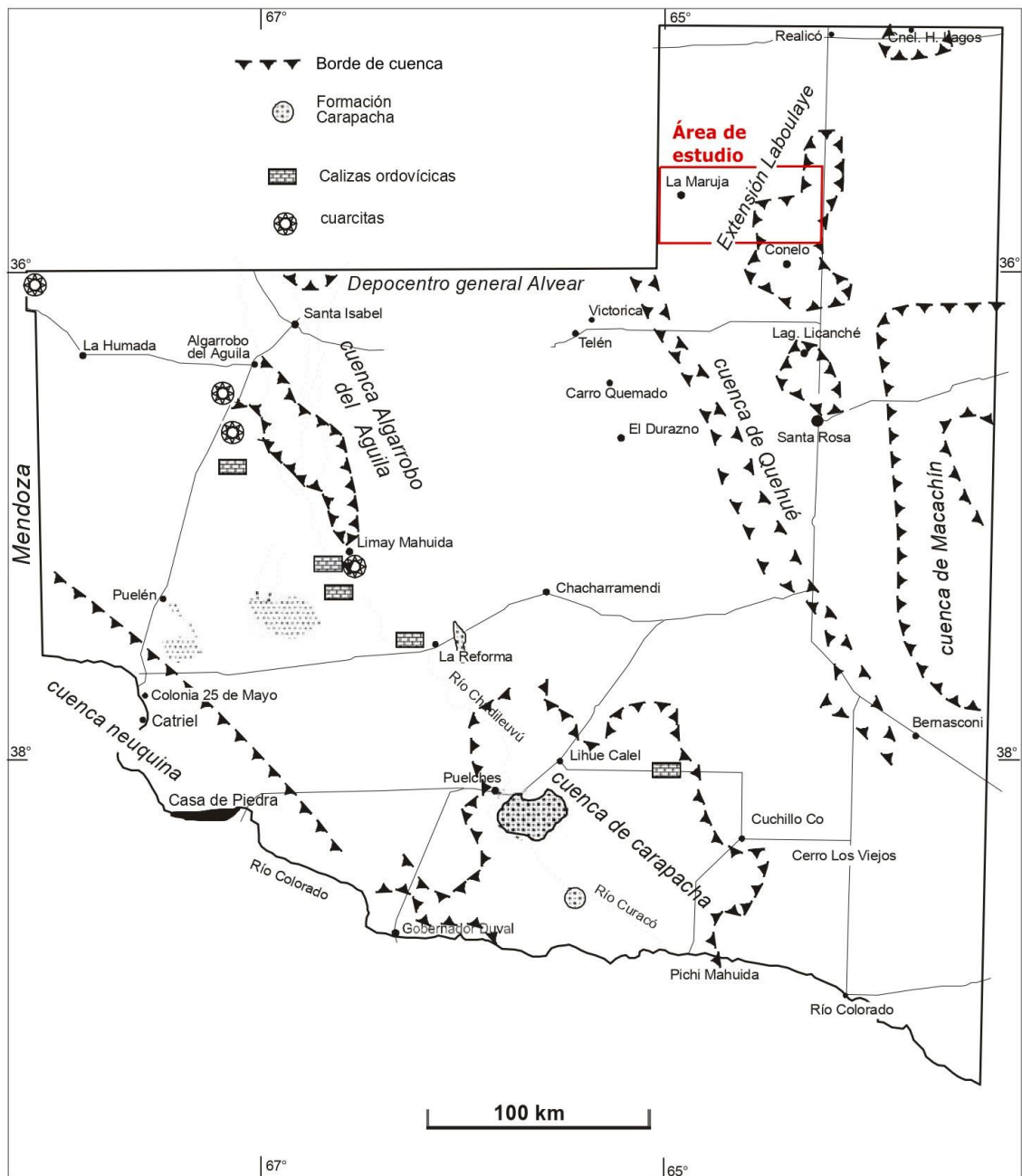


Figura 30. Ubicación de las cuencas sedimentarias de La Pampa extraído y modificado de Kostadinoff y Llambías (2002), señalando el área de estudio (rojo).

Otro estudio realizado por Kostadinoff *et al.* (2006), a partir de mediciones geofísicas en el sur de la provincia de San Luis, determinó los límites de la cuenca de rift de Nueva Galia de edad permo-triásica, desarrollada entre la localidad homónima al norte, hasta el pueblo de Arizona al sur, con aproximadamente 80 km. de longitud y 12 km. de ancho. Estos autores proponen que la cuenca de Nueva Galia continúa en la cuenca de Quehué en la provincia de La Pampa, y a su vez podría continuar hacia el oeste conectando la extensión de la cuenca de Laboulaye, abarcando el área de estudio (Figura 31). Esto último planteado también puede observarse en el trabajo de De Elorriaga *et al.* (2013), a partir de mediciones geofísicas que

abarcen el área de estudio. Si bien está destinado a la caracterización de la cuenca de Quehué, se observa a partir del mapa de anomalías de Bouguer (Figura 32), lo planteado por Kostadinoff *et al.* (2006).



Figura 31. Configuración de los rift triásicos y cretácicos del centro de Argentina. Tomado de Kostadinoff *et al.* (2006).

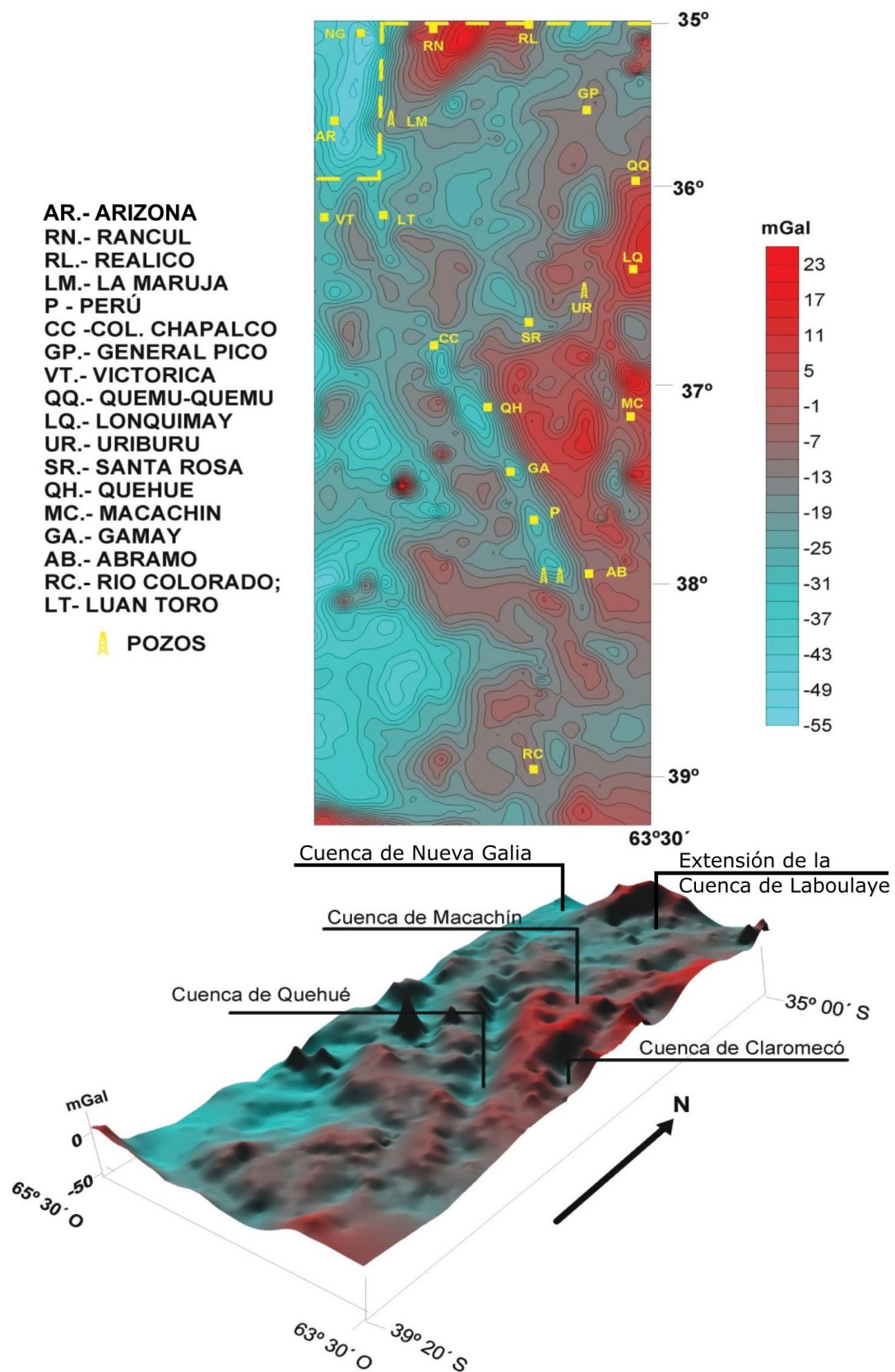


Figura 32. Mapa de anomalías de Bouguer del este de la provincia de La Pampa y las cuencas sedimentarias detectadas. Tomado y modificado de De Elorriaga *et al.* (2013).

Respecto al Cenozoico, Folguera (2011) determinó en el centro de la provincia de La Pampa la existencia de una unidad geológica independiente denominada Bloque de la Pampa Central (Figura 33). Se extiende en dirección N-S a lo largo de más de 300 km con un ancho variable entre 200 y 80 km (Folguera y Zarate, 2018). Hacia los límites oeste y este, se localizan las fallas Desaguadero-Salado y Uriburu, con una expresión geomorfológica que genera desniveles topográficos marcados en el ambiente de llanura, coincidiendo la primera falla mencionada en profundidad con la sutura entre los terrenos de Cuyania y Pampia (Folguera y Zarate, 2018). El basamento del bloque está ligeramente inclinado hacia el este y corresponde a la prolongación sur de las Sierras Pampeanas, y se encontraría a una profundidad promedio de 200 m (Folguera y Zarate, 2018).

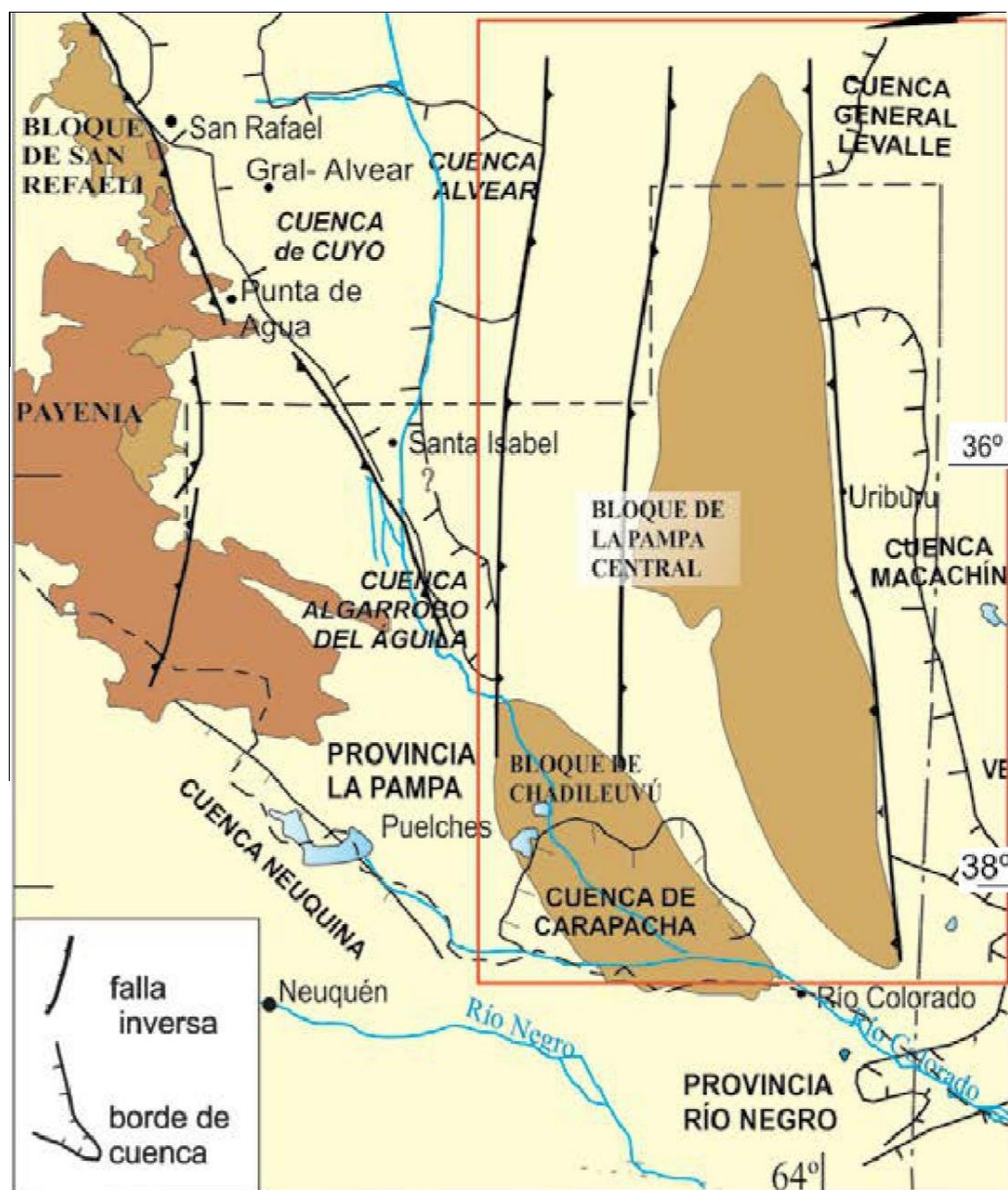


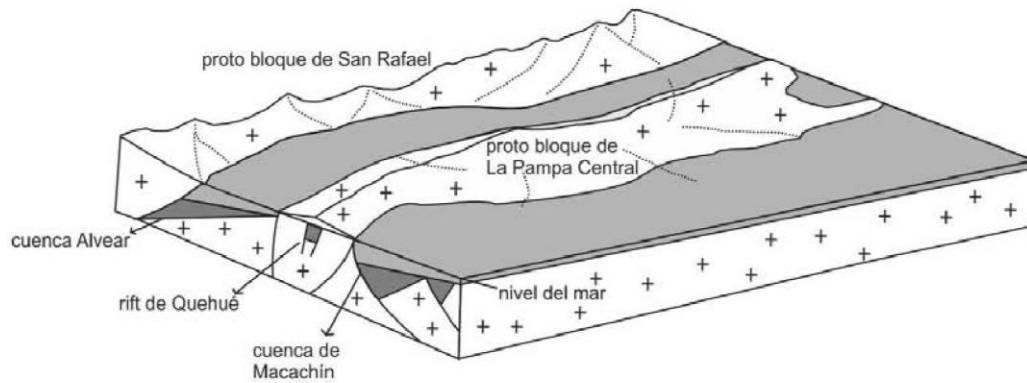
Figura 33. Ubicación del Bloque de la Pampa Central, y otros bloques y cuencas de la provincia de La Pampa y alrededores, extraído de Folguera y Zarate (2009).

El Bloque de la Pampa Central tiene dos características distintivas, la primera es la presencia de la Formación Cerro Azul, cubierta sedimentaria miocena tardía de unos 150-200 m de espesor, cuyo techo remata en una costra calcárea; mientras que la segunda es que no presenta registros de depósitos marinos provenientes del mar Paranaense del Mioceno medio – tardío. Por lo tanto, la Formación Cerro Azul apoya directamente sobre el basamento, según señalan las perforaciones descriptas en el área (Folguera, 2011).

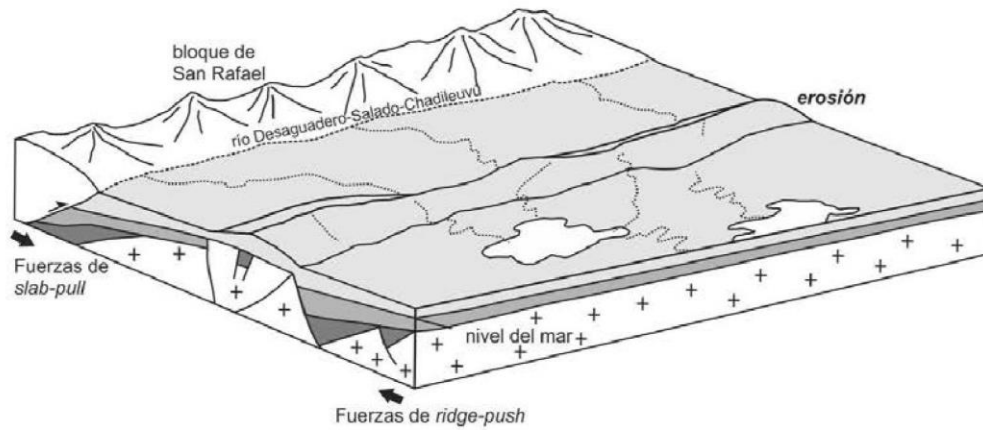
El levantamiento del Bloque de la Pampa Central mediante la reactivación de los corrimientos de Desaguadero-Salado y Uriburu que lo limitan, se habría producido por un campo de esfuerzos compresivos vinculado con la Cordillera de los Andes (asociado con un estadio de subducción de bajo ángulo) y la dorsal centro-oceánica (Folguera y Zarate, 2018), durante el Mioceno tardío.

Respecto a la tectónica, Folguera y Zarate (2018) proponen tres estadios principales: uno a los ~12 Ma, donde las cuencas de Macachín y probablemente la de Alvear fueron invadidas por el mar Paranaense, mientras que los protobloques de San Rafael, el de La Pampa Central, el Positivo Bonaerense y el de Chadileuvú actuaron como áreas emergidas. Alrededor de los ~8 Ma la región fue cubierta por depósitos continentales (Formación Cerro Azul). Posteriormente, en el Mioceno tardío-Plioceno temprano (~6,8 Ma) el bloque de La Pampa Central fue levantado y basculado reactivando estructuras previas (Figura 34).

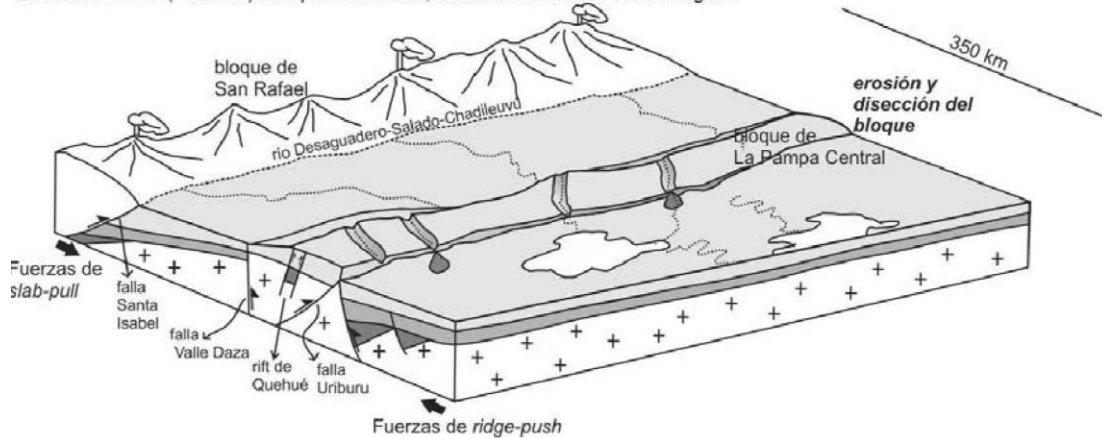
A. Mioceno tardío (~12 Ma)



B. Mioceno tardío (~8 Ma): subsidencia dinámica en el antepaís



C. Mioceno tardío (~6.8 Ma): antepaís fracturado, reactivación de estructuras antiguas



- Formación Cerro Azul
- Mar Paranense
- Depósitos cretácicos
- +
 Basamento precámbrico-paleozoico

Figura 34.. Esquema evolutivo del Mioceno tardío del Bloque de la Pampa Central. Tomado de Folguera y Zarate (2018).

Por otro lado, y a menor escala, se localiza el denominado por Malán (1981) Bloque Rucanelo-Conhelo, que se ubica hacia el sur del área de estudio, y presenta una suave pendiente inclinada hacia el este, alcanzando una profundidad de 200 metros aproximadamente en dirección a la localidad de Conhelo.

Por su parte, De Elorriaga y Tullio (1998), dada la complejidad de dilucidar el subsuelo por su amplia cobertura neógena-cuaternaria, y con el fin de dar respuesta a los interrogantes a partir de las perforaciones realizadas por la Dirección Nacional de Geología y Minería (DNGM) y datos sísmicos de refracción existentes en el área, realizaron distintos perfiles para estudiar el comportamiento del basamento y distintas formaciones en el área, proponiendo un sistema de estructuras (Figura 35). En la Figura 36 se observa un perfil desde cercanías de Loventué hasta General Pico, en el cual se puede esclarecer el mencionado Bloque Conhelo-Rucanelo. El mismo estaría limitado al este por una falla próxima a la localidad de Conhelo con un desnivel de 80 metros aproximadamente, y ya en la estación de Boeuf ($35^{\circ}37'38''S$; $64^{\circ}26'34''O$), la perforación existente de 110,7 m, atraviesa formaciones sedimentarias pliocenas pero no alcanza el basamento. Hacia el oeste de Rucanelo, el basamento vuelve a profundizarse, y detectan la Formación Macachín, indicio de intrusión marina. Hacia el oeste de Eduardo Castex, el labio hundido del basamento se continúa como un amplio talón que encuentra una nueva dislocación en el plano de falla que configura el límite occidental de la cuenca de Macachín, entre Eduardo Castex y Metileo (Malán, 1981).

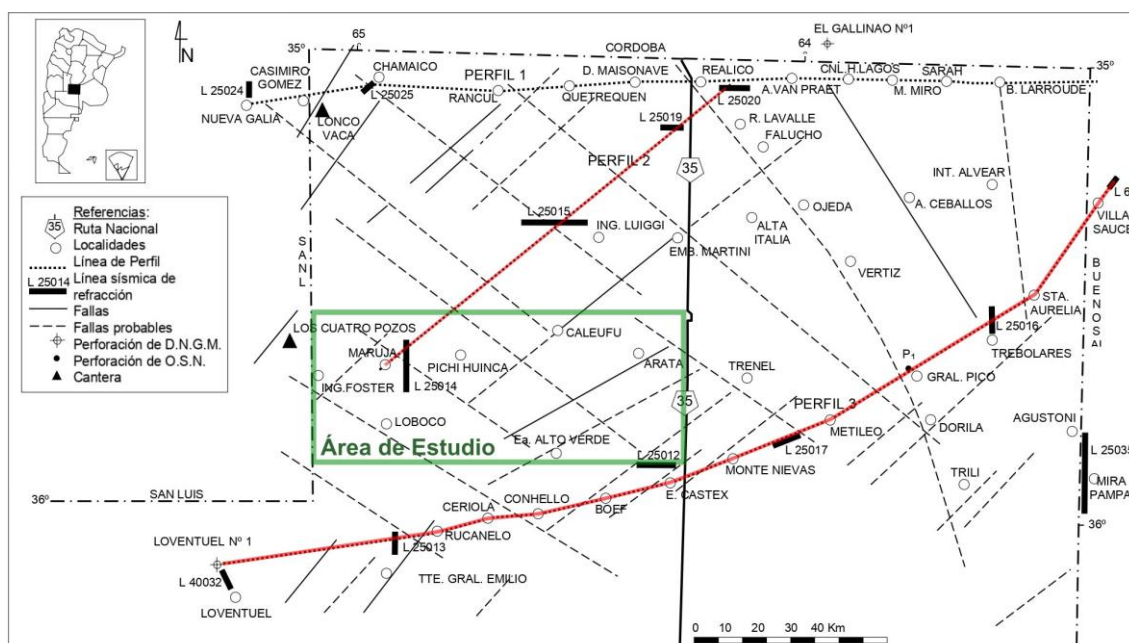


Figura 35. Ubicación del sistema de fallas y perfiles propuestos (rojo) por De Elorriaga y Tullio (1998).

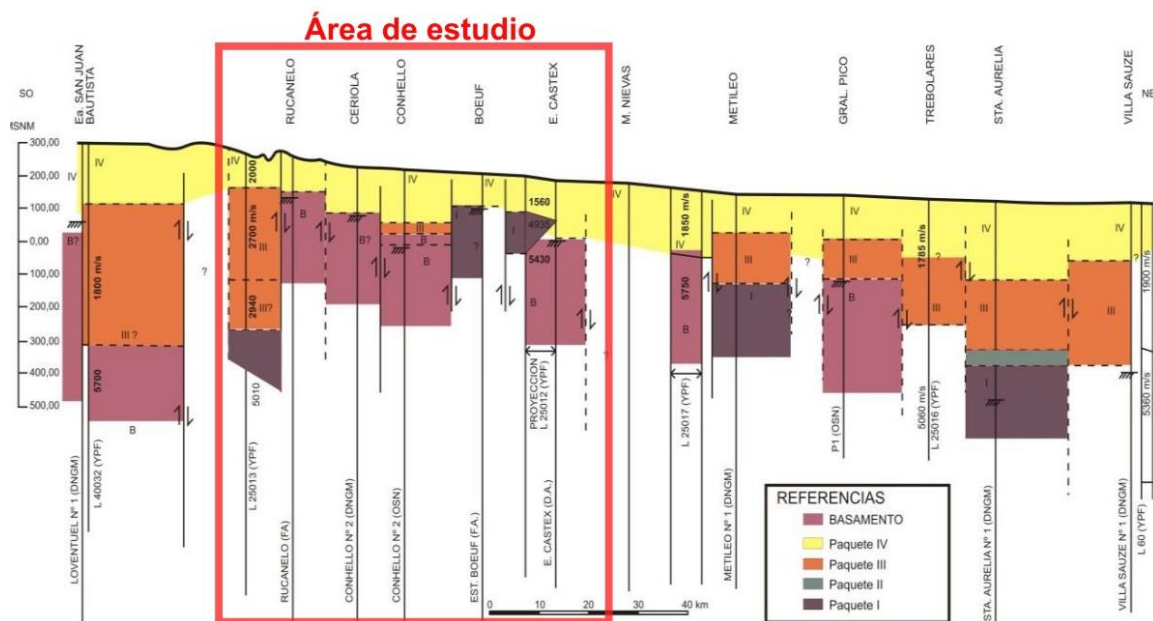


Figura 36. Perfil estratigráfico SO-NE de Santa Aurelia – Villa Sauze. SO-NE. Tomado de De Elorriaga y Tullio (1998). Paquete IV: Formación Cerro Azul. Paquete III: Formación Macachín. Paquete II: Formación Abramo. Paquete I: Formación Arata.

Por otro lado, estos autores proponen un perfil entre las localidades de La Maruja, Ingeniero Luigi y Realicó (Figura 37), en el que se revela una profundización del basamento de hasta unos 2.500 m s.n.m., pudiendo formar parte de la extensión de la cuenca de Laboulaye propuesta por distintos autores (Kostadinoff y Llambías, 2002; entre otros ya mencionados). Los paquetes más desarrollados son el I y III correspondientes a la Formación Arata (Pérmico) y Formación Macachín (Mioceno medio) respectivamente. Esta última correspondiente al ingreso del mar Paranaense.

Según estos autores (De Elorriaga y Tullio, 1998), los sistemas de fracturas se orientan con dos distintos rumbos limitando pequeños bloques alargados: NO-SE, en el cual los movimientos difieren en la parte superior e inferior y domina la componente vertical; y NE-SO, las fallas se reactivan como inversas. Hacia el este concluyen que el desplazamiento es lateral antihorario, lo que se aprecia en el diseño de curvas de nivel. Los efectos de esta tectónica generaron el levantamiento de algunas zonas en el área de estudio, entre ellas el mencionado Bloque Rucanelo-Conchello, y la profundización de otras como la de Ingeniero Luigi. Este levantamiento mencionado del basamento, también se conecta con la ausencia de tosca por erosión en zonas elevadas, apareciendo sus restos en depresiones.

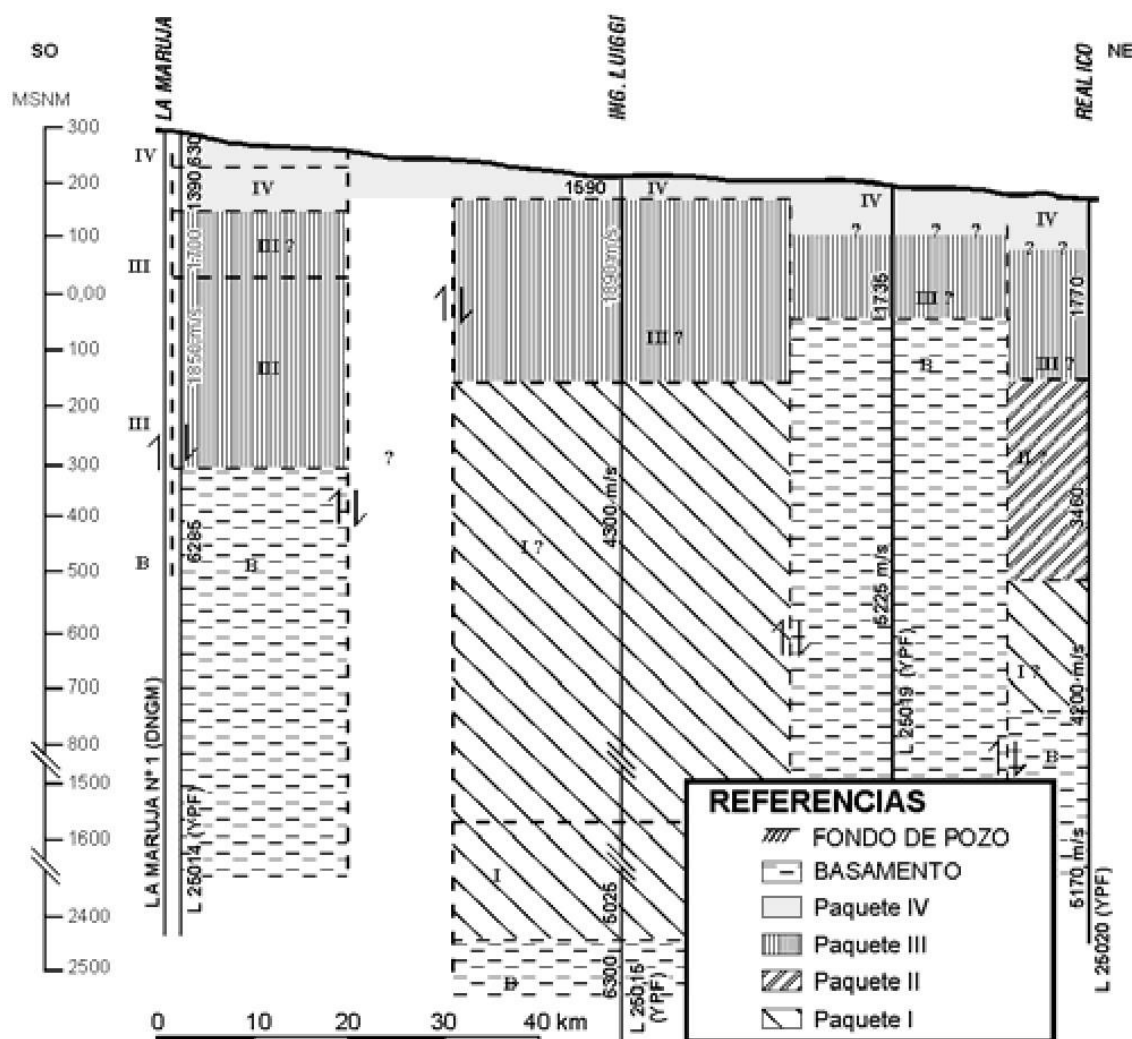


Figura 37. Ubicación y perfil estratigráfico entre las localidades de La Maruja – Realicó, tomado de De Elorriaga y Tullio (1998). Paquete IV: Formación Cerro Azul. Paquete III: Formación Macachín. Paquete II: Formación Abramo. Paquete I: Formación Arata.

Por su parte, Ceballo (2020) realizó una correlación O-E entre la localidad de La Maruja y la Estancia Santa Aurelia (Figura 38), teniendo en cuenta los paquetes sedimentarios propuestos por los autores anteriores y las perforaciones profundas existentes. El basamento fue detectado en La Maruja a los 700 m de profundidad (-420 m s.n.m.), en Trenel a 156 m de profundidad (-26 m s.n.m.) y en General Pico a una profundidad de 265 m (-123 m s.n.m.). En la localidad de Arata no se logra llegar al basamento, pero Kostadinoff y Llambías (2002) determinaron esa área con una importante anomalía negativa y que formaría parte de la extensión de la cuenca de Laboulaye al igual que en la zona aledaña de Ingeniero Luiggi, por lo que el basamento debe encontrarse a gran profundidad.

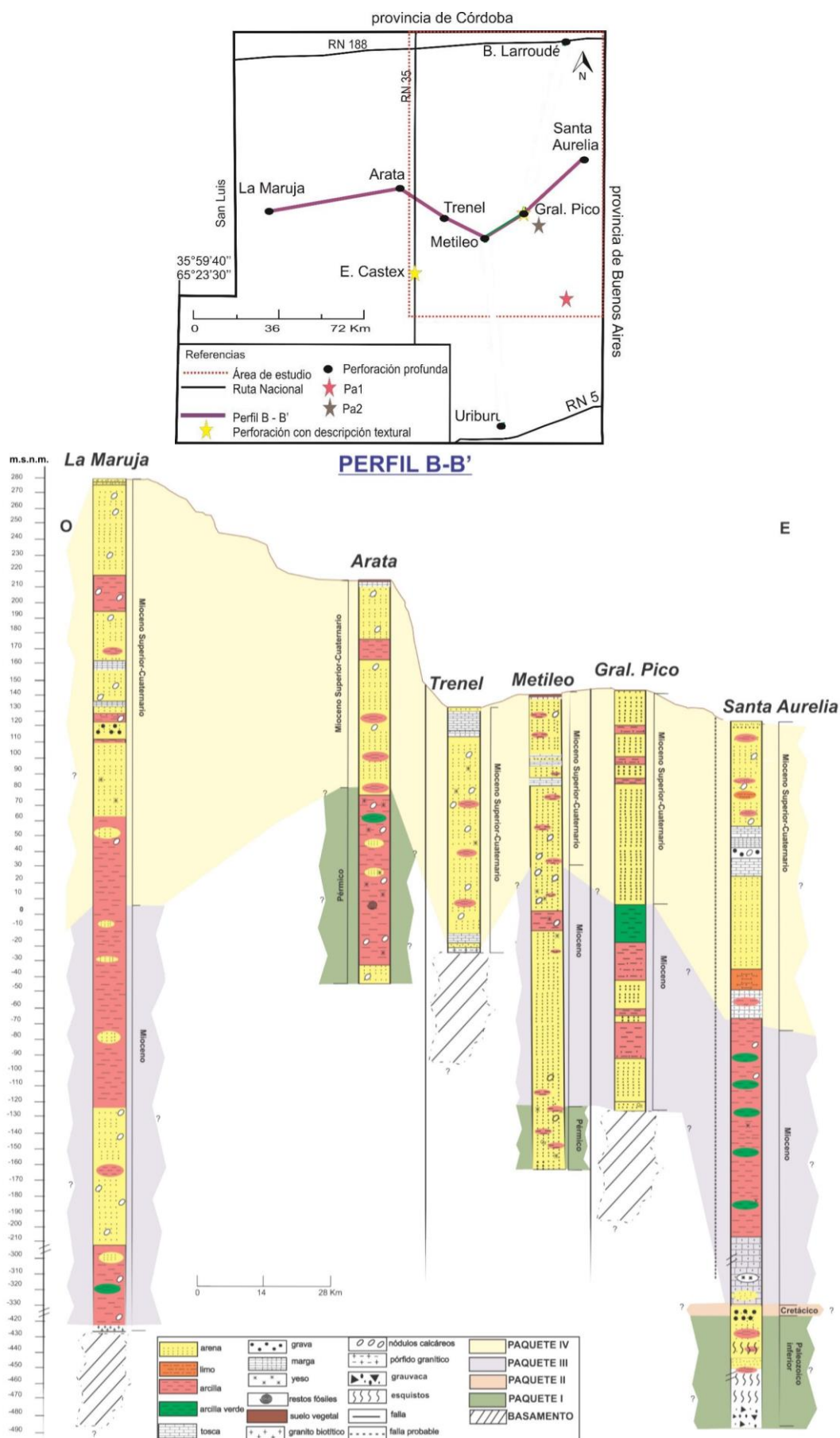


Figura 38. Perfil estratigráfico de La Maruja – Santa Aurelia (O-E), extraído de Ceballos (2020).

4.2.2 Estratigrafía

Como se mencionó, el conocimiento del subsuelo de la provincia de La Pampa fue explorado principalmente a través de estudios geofísicos en búsqueda de zonas petrolíferas y agua subterránea. Principalmente, la información aportada por la Dirección Nacional de Geología y Minería (DNGM), Dirección General de Industria Minera (DGIM), Dirección de Aguas de la Provincia de La Pampa, la Administración Provincial del Agua (APA), entre otras, permitió plantear la estratigrafía local.

La composición estratigráfica correspondiente al área de estudio, se realizó teniendo en cuenta las dos unidades hidrológicas que abarca: la Región de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos y la Región de la Planicie Pampeana Central. Se contó con la información aportada por 114 fichas de perforaciones que captan el acuífero freático dentro del área de estudio realizadas por la APA, de las cuales un gran número presenta informes litológicos y detallan parámetros hidráulicos; y con fichas e informes de perforaciones profundas realizadas por la DNGM en localidades del área de estudio. Además, se cuenta con la información de la tesis doctoral de Ceballo (2020) donde detalla las características de una perforación realizada en las inmediaciones de Eduardo Castex, en el extremo suroeste del área de interés. Por último, se cuenta con una perforación de estudio efectuada dentro del marco de esta tesis, en la localidad de Arata de 48 metros de profundidad, enmarcado en un convenio entre la Cooperativa de Servicios Públicos de Arata Ltda. (COSEPAR), la APA y la FCEyN-UNLPam.

Por otra parte, se cuenta con el estudio De Elorriaga y Tullio (1998) como base principal para definir la estratigrafía local, donde plantearon entidades litológicas que denominaron Basamento, Paquete I, II, III y IV (de más antiguo a más joven) como se observan en las Figura 36 y Figura 37, dado que no pudieron definirlos con exactitud con la información existente. Los autores describen un basamento de rocas metamórficas precámbricas intruidas por granitos y pegmatitas del Paleozoico inferior; el paquete I lo correlacionan con la Formación Arata perteneciente al Pérmico; el paquete II con la Formación Abramo de edad cretácica; el paquete III con la Formación Macachín del Mioceno; y finalmente, el paquete IV es correlacionado con las Formación Cerro Azul del Mioceno superior y Formación Junín del Holoceno.

4.2.2.1 Descripciones litológicas

Ceballo (2020) realizó una caracterización textural de los sedimentos obtenidos de una perforación localizada a 8 km de la localidad de Eduardo Castex, realizada en 2014, representativa de la región de la planicie con tosca (Cano *et al.*, 1980) y ubicada en el extremo sureste del área de estudio. El pozo tiene una profundidad de 50,5 m y se extrajeron 8 muestras de sedimentos. La

autora destaca que desde los 24 m de profundidad la textura varía entre franca y franca arenosa hasta aproximadamente los 42 m, a partir de donde comienza un dominio de sedimentos más finos sobre las arenas, manifestando una textura franca limosa. Por último, al final de la perforación, los sedimentos presentan un dominio de arenas, con una textura franca. Los principales materiales que contienen al Acuífero Pampeano son limos arenosos.

Por otro lado, se obtuvo información de una perforación realizada en el marco de esta tesis en la localidad de Arata, con una profundidad de 48 metros, también representativa de la planicie con tosca y situada al noreste del área de estudio, a partir de la cual se efectuó un croquis de la perforación con la descripción litológica (Figura 39) y un gráfico comparativo de textura (Figura 40).

Durante la perforación se extrajeron muestras cada 2 metros de profundidad y se unificaron aquellos niveles consecutivos que fueran similares, enviando a analizar sólo una muestra representativa. Teniendo en consideración los resultados del análisis, se observa una textura predominante franco limosa en los primeros 6 metros de profundidad, y a partir de allí, se produce un aumento de la fracción arenosa clasificándose como franca hasta los 44 metros. Desde esta profundidad hasta el final de la perforación el contenido de arcilla y limo aumenta, clasificando la textura como franco limosa nuevamente. A su vez, con la descripción litológica se determina un contenido de pántinas de óxidos de manganeso (MnO) abundante desde los 12 a los 22 metros de profundidad, que disminuye en el resto del perfil.

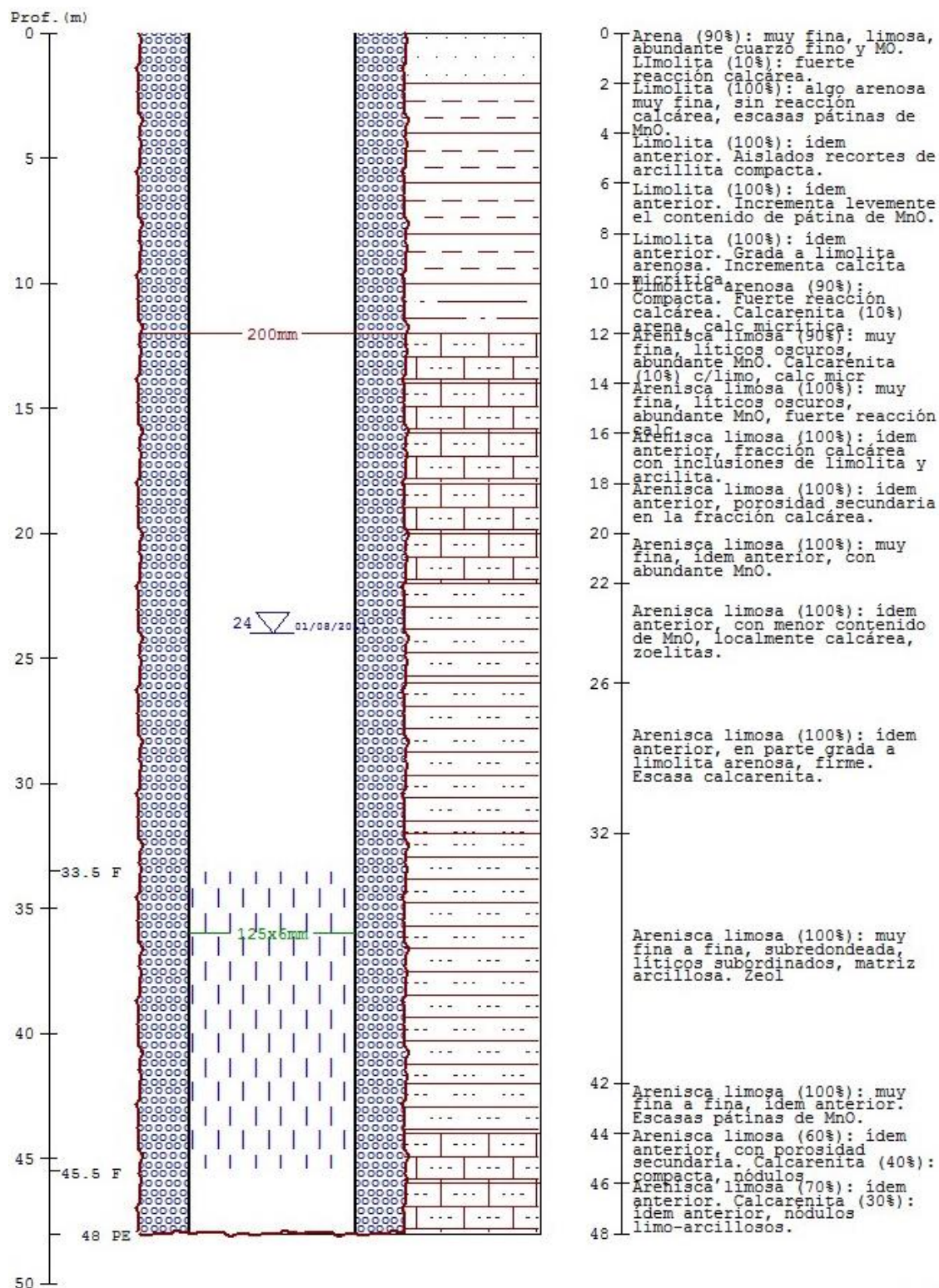


Figura 39. Descripción litológica de la perforación de estudio realizada en Arata.

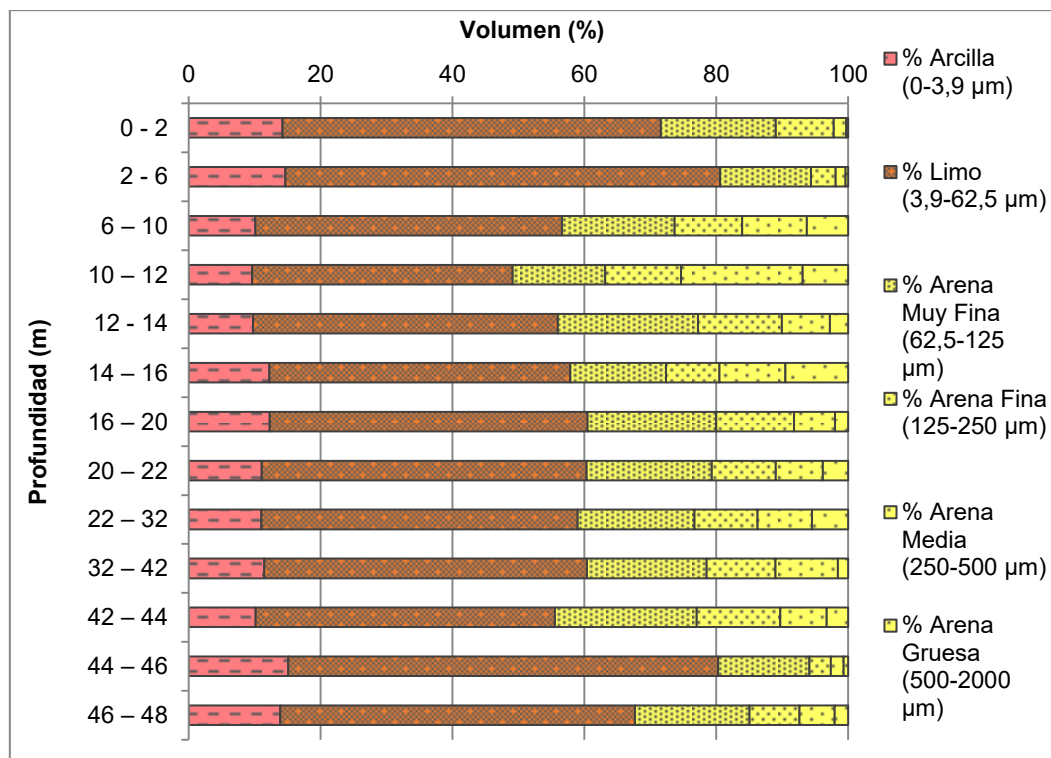


Figura 40. Textura de los sedimentos correspondientes a la litología atravesada en la perforación de Arata.

Las muestras de sedimentos extraídas a distintas profundidades fueron analizadas para la determinación de porcentaje de carbonato (CO_3^{2-}), pH y conductividad eléctrica. Respecto al carbonato se observa (Figura 41) un bajo porcentaje en los primeros 10 metros de profundidad, aumentando y variando entre 2% y 4% entre los 10 y 44 metros, mientras que entre los 44 m y 48 m presenta un incremento importante en el porcentaje, superando el 8%. El pH por su parte, presenta un comportamiento similar al del carbonato, con un valor de 8,1 en los primeros metros, aumentando hacia mayor profundidad hasta alcanzar un pH de 9. La conductividad eléctrica (Figura 42) también refleja una evolución similar, aumentando hacia mayor profundidad, registrando un valor de 387 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los primeros metros, alcanzando a los 46 metros una conductividad eléctrica de 842 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

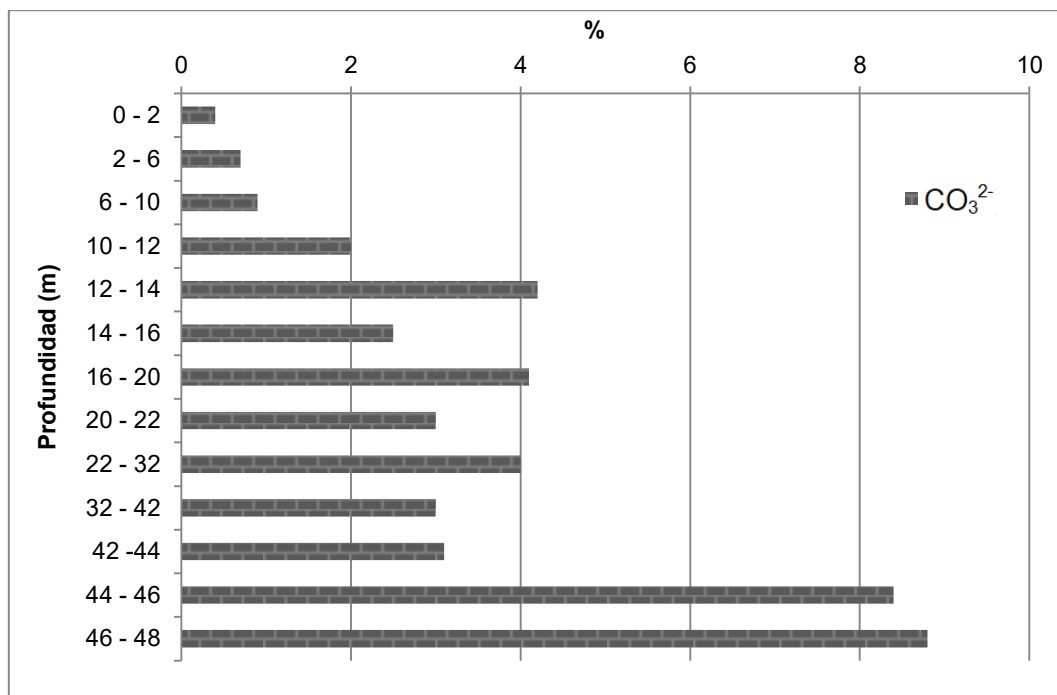


Figura 41. Porcentaje de carbonato (CO_3^{2-}) en sedimentos a distintas profundidades de la perforación de Arata.

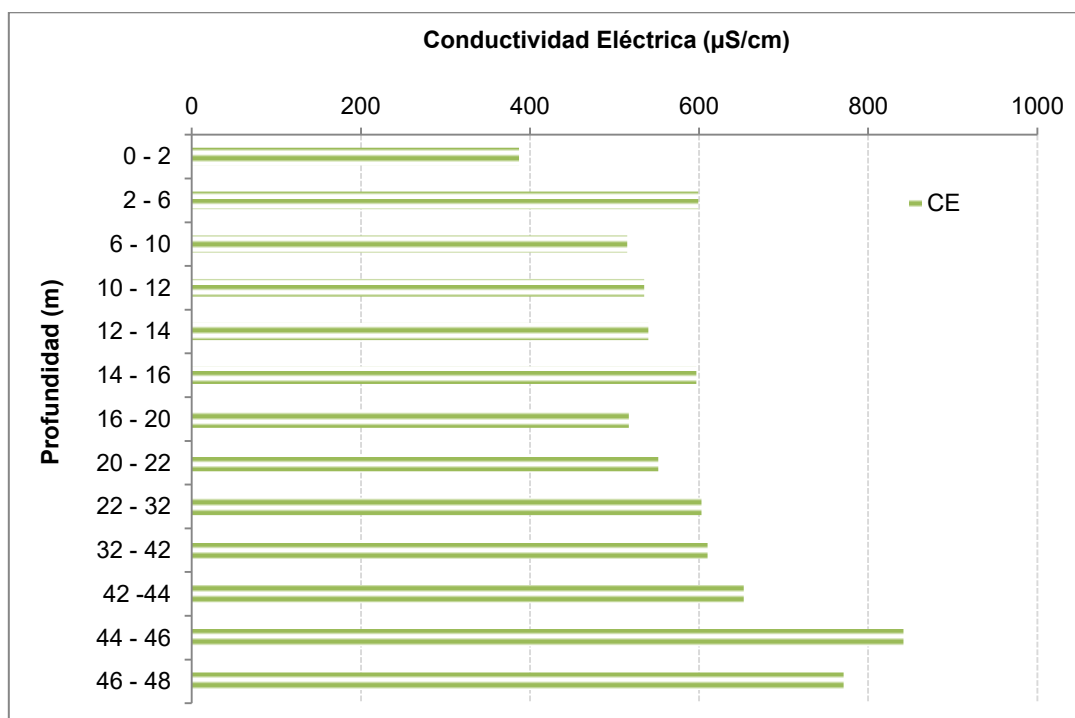


Figura 42. Valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$) en sedimentos a distintas profundidades de la perforación de Arata.

A partir de esta misma perforación e información de fichas de pozos realizados por la APA y otros organismos, se realizaron perfiles litológicos representativos de distintas partes del área de estudio e inmediaciones (Figura 43).

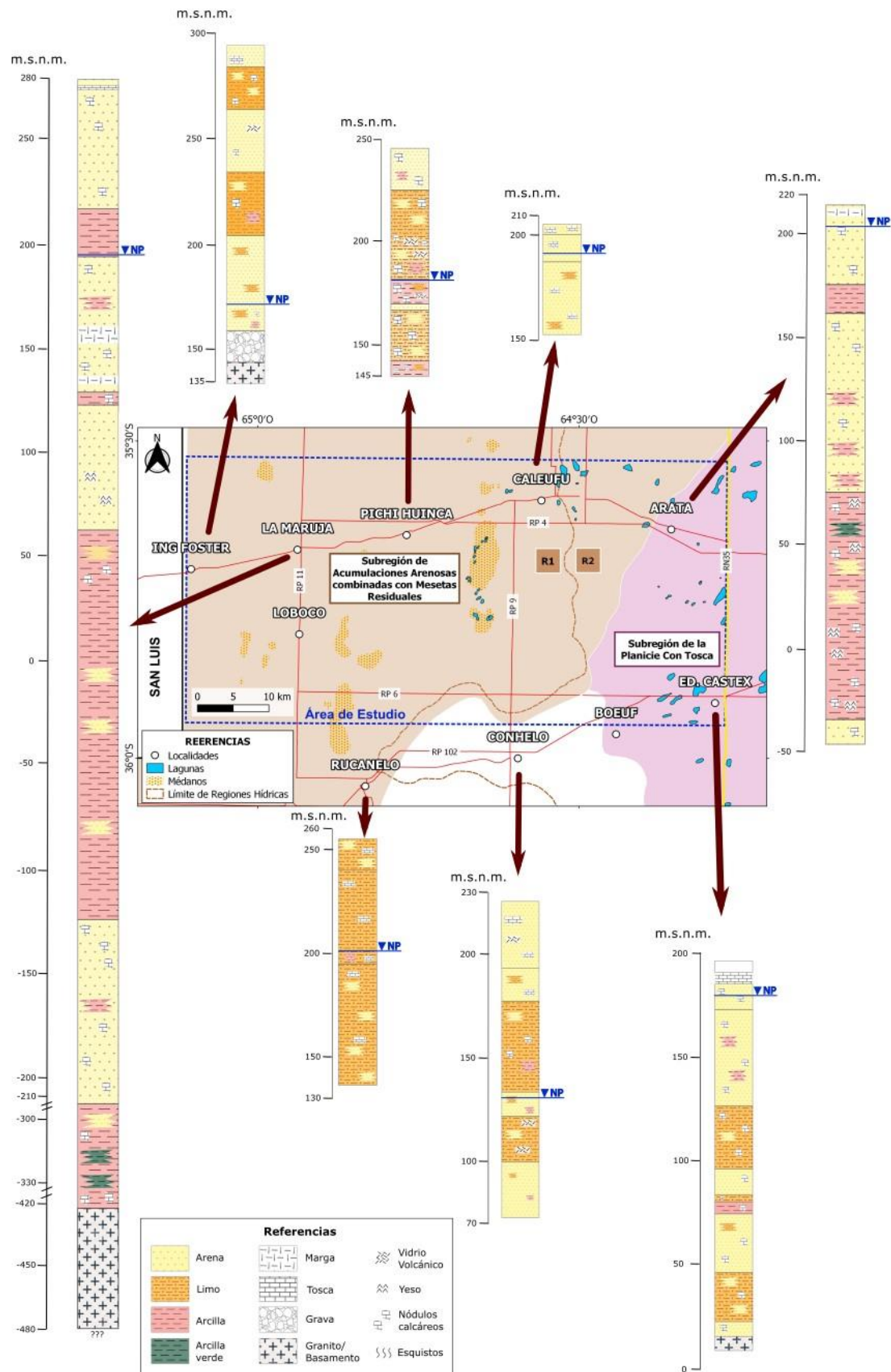


Figura 43. Columnas litológicas del área de estudio e inmediaciones. R1: Región Hídrica de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos; R2: Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central. NP: Nivel Piezométrico.

En las columnas litológicas es posible reconocer los rasgos de las subregiones fisiográficas de Acumulaciones Arenosas Combinadas con Mesetas Residuales hacia el oeste y de la subregión de la Planicie con Tosca hacia el este (Cano *et al.*, 1980). La litología de dichas subregiones presentan características similares comenzando por un espesor variable de arena en los primeros metros que incluso puede estar muy reducida, seguido por una capa de tosca o una arena fuertemente cementada, apoyada predominantemente sobre sedimentos finos, principalmente arenas finas a limosas con cementación o nódulos calcáreos e intercalaciones arcillosas. En la planicie con tosca, en la localidad de Arata, cuyo pozo es de mayor profundidad, se observa a partir de los 120 m s.n.m. aproximadamente un estrato arcilloso con porcentaje de yeso y la presencia de lentes de una arcilla “verde” de edad pérmica (De Ellorriaga y Tullio, 1998).

En la planicie con tosca, la perforación localizada en Eduardo Castex alcanza una roca granítica a los 175 m bajo boca de pozo, por lo que el basamento se encontraría a los 8 m s.n.m. aproximadamente, mientras que en las demás perforaciones no fue posible alcanzarlo, pero considerando los trabajos de De Ellorriaga y Tullio (1998) en la localidad de Conhelo, debe encontrarse cercano a los 230 m de profundidad desde la superficie, es decir aproximadamente a los 0 m s.n.m. En la localidad de Arata, según Kostadinoff y Llambías (2002), el mismo presenta una profundidad mayor, perteneciendo a una posible extensión de la cuenca Laboulaye. En la subregión de las acumulaciones arenosas con mesetas residuales el basamento se observa sólo en las localidades de Ingeniero Foster y La Maruja, a aproximadamente 150 y 700 m desde boca de pozo respectivamente, equivalente a 145 m s.n.m. y a 420 m por debajo del nivel del mar, indicando una probable falla entre ambas localidades.

4.2.2.2 Columna estratigráfica del área de estudio

A partir de la información base sobre la litología en el área, se realiza una columna estratigráfica para el área de estudio (Figura 44) y se describen las unidades litológicas más importantes.

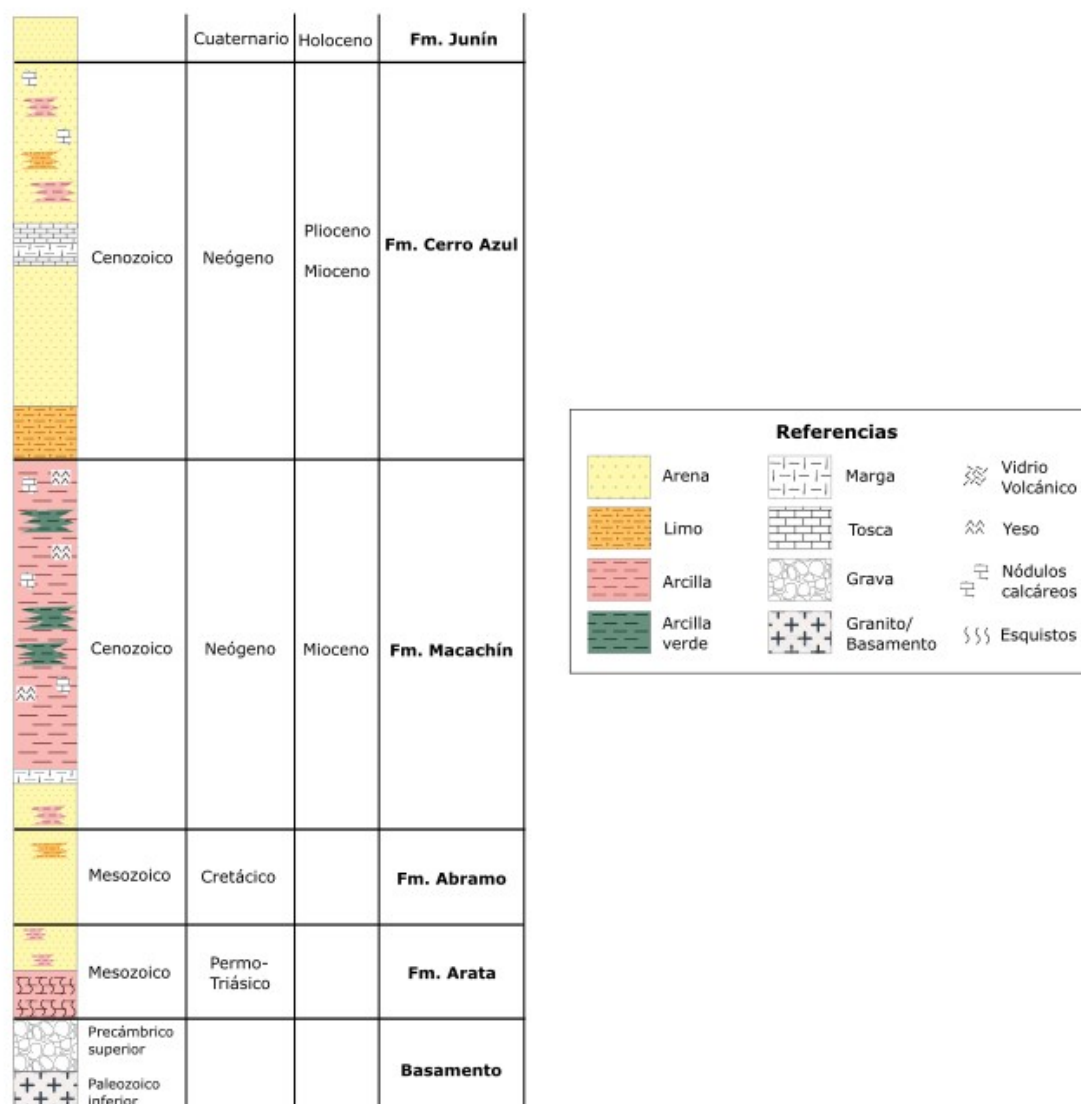


Figura 44. Cuadro estratigráfico representativo del área de estudio.

Basamento

El basamento del Bloque de la Pampa Central está integrado por un complejo ígneo metamórfico precámbrico superior-paleozoico inferior, que representaría la continuación austral del basamento aflorante en las Sierras Pampeanas de San Luis hacia el norte, y sedimentitas paleozoicas y mesozoicas (De Elorriaga, 2010; Folguera y Zárte, 2018). El afloramiento más cercano se localiza en la sierra de Lonco Vaca al norte del área de estudio.

Formación Arata (Salso, 1966)

En sus niveles inferiores incluye areniscas finas a medianas con escasa mica y yeso, restos carbonosos e intercalaciones de arcillas esquistosas. Las capas superiores están integradas por arcillas compactas y fragmentosas, con algo de mica, yeso y carbonato de calcio. El espesor de esta formación es desconocido y se acepta para ella una posible edad permo-triásica. En el área de estudio,

según Salso (1966), los sedimentos de esta formación fueron alcanzados en las perforaciones de Arata, atravesando un total de 120 m.

Formación Abramo (Salso, 1966)

Está conformada por limolitas areniscosas y areniscas cuarzosas finas con intercalaciones de arcillas. En los niveles inferiores de la formación, sobre el basamento granítico, se presenta una limolita algo arenosa, gruesa, de grano heterogéneo. Las limolitas y las arcillitas tienen laminación fina, lo cual indicaría que se depositó en un ambiente de aguas tranquilas, con leves entrecruzamientos y acuífamientos. El paso de esta Formación al basamento corresponde a una discordancia. El espesor de la Formación Abramo es de aproximadamente de 300 m y podría ser de edad cretácica (Salso, 1966).

Formación Macachín (Salso, 1966)

Integrada por limos y arenas con intercalaciones arcillosas y niveles de grano más grueso en su base; como material epigenético se encuentran el yeso y la anhidrita, carbonato y material piroclástico. Los niveles superiores presentan una granulometría de fina a muy fina, en tanto que hacia la base presenta areniscas gruesas, conglomerádicas, con matriz arenosa y cemento arcilloso. Salso (1966) estima que la Formación Macachín tiene un origen marino considerando la presencia de sedimentos color verde y el alto porcentaje de yeso que requiere de una elevada concentración salina de las aguas madres, propias de un mar mediterráneo. Respecto a la edad, este autor propone que es oligo-miocena.

Formación Cerro Azul (Llambías, 1975)

Bajo esta denominación, Llambías (1975) incluyó a “todos los limos arenosos pardo rosados a rojizos, sin estratificación interna o muy poco visible, con frecuentes clastos de arcillas rojizas, y que están dispuestos subhorizontalmente. Tiene formas de erosión tipo loess con barrancas y cañadones abruptos. En la parte superior los sedimentos están reemplazados por tosca que llega a tener 2 m de espesor”. Con respecto a la costra de tosca, el nivel superior de mayor cota se ha descrito históricamente como el término superior de la Formación Cerro Azul. Sin embargo, la relación entre los depósitos de esta formación y la costra de tosca es discordante e involucra un hiato (Vogt *et al.*, 1999). Existen evidencias que permiten señalar la modificación del régimen de transporte de material, que marca un aumento brusco de la energía del sistema, y la aparición de gran cantidad de carbonato de calcio, factores que se asocian con una modificación climática (Folguera y Zárate, 2009).

La edad de la Formación Cerro Azul, inferida partir de su contenido de vertebrados fósiles, se asigna al Mioceno superior (Visconti, 2007). Esta formación ha sido alcanzada en la totalidad de las perforaciones analizadas en el área de estudio.

De acuerdo con Folguera (2011), los resultados de estudios mineralógicos han demostrado que los sedimentos corresponden a materiales sedimentarios volcánico-clásticos, en tanto que el área de aporte de los sedimentos está vinculada con el ámbito andino. Contiene un importante contenido de material de origen volcánico (cenizas dacíticas a riolíticas, vidrio volcánico y pumicita) proveniente de erupciones Andinas. Estos sedimentos se encuentran diagenéticamente alterados, propios de climas semiáridos, presentando importante contenido de material de origen volcánico (cenizas dacíticas a riolíticas, vidrio volcánico y pumicita) proveniente de erupciones Andinas. (Smedley *et al.*, 2000). La disolución del vidrio volcánico proveniente de esta formación es uno de las principales consecuencias que origina a los acuíferos arseníferos en la región Pampeana como también a la presencia de otros elementos traza (Smedley *et al.*, 2000; Bocanegra *et al.*, 2002; Nicolli, 2006), y los nódulos de óxidos de los distintos metales presentes en dicha formación son factores fundamentales en la movilidad del oligoelemento (Smedley *et al.*, 2000).

Formación Junín (De Salvo et al., 1969)

Esta formación fue descripta para la ciudad de Junín por De Salvo *et al.* (1969), pero luego se hizo extensiva para gran parte de la provincia de Buenos Aires y La Pampa. Según Rimoldi y Silva Nieto (1999) se trata de depósitos eólicos de edad Holocena que se extienden en gran parte de la provincia de La Pampa, cubriendo en su mayor parte el área de estudio. Está constituida por “sedimentos limo arenosos a arena limosos, de color pardo rojizo a pardo claro, muy friables” (CFI, 1975). Los clastos se destacan por presentarse muy sueltos, masivos y por la ausencia de cuerpos epigenéticos de tosca.

4.2.2.3 Mineralgía de los sedimentos de área de estudio

Como antecedentes en el área, se cuenta con los estudios realizados por Smedley *et al.* (2000) en muestras de sedimentos colectados en una perforación cercana a la localidad de Eduardo Castex. Los análisis realizados determinaron que el loess característico del área está dominado por limos con una proporción alta de plagioclasas sódicas junto a cuarzo, feldespato potásico, ferromagnesianos alterados y reemplazados por abundantes óxidos de hierro y manganeso, vidrio volcánico y minerales pesados, mientras que la precipitación secundaria de carbonato de calcio se presenta en su mayoría como nódulos calcáreos, cemento y capas de tosca. A su vez, se registran óxidos, oxihidróxidos e hidróxidos amorfos de hierro y aluminio. Por otro lado, estos

autores determinaron que el loess es de composición andesítica-dacítica con un contenido de SiO_2 que varía entre el 53% y 68%, Al_2O_3 variable entre 10% y 16%, mientras que la composición de los componentes mayoritarios es muy similar a la descrita por Nicolli *et al.* (1989) para loess extraídos de sedimentos de la provincia de Córdoba. El vidrio volcánico en esa provincia, por su parte, presenta una composición riolítica, por lo que contiene una mayor concentración de SiO_2 , Na_2O , K_2O y Rb que los sedimentos pampeanos (Nicolli *et al.*, 1989; Smedley *et al.*, 2000).

Por otra parte, se cuenta con la información aportada por la tesis de Ceballo (2020), donde se analizaron muestras de una perforación también ubicada en cercanías de Eduardo Castex, concluyendo que los sedimentos presentan una composición mineralógica muy homogénea, dominando principalmente los minerales de cuarzo, feldespato y calcita, con presencia generalizada en todo el perfil de material amorfo correspondiente a vidrio volcánico.

También se realizaron análisis de difracción de rayos X en los sedimentos extraídos de la perforación realizada en la localidad de Arata. La composición mineralógica en profundidad presenta una importante homogeneidad, dominando principalmente el cuarzo y el feldespato (específicamente andesina). Otro de los minerales de mayor dominancia es la calcita, que se logra identificar en cantidades subordinadas a partir de los 16 metros, aumentando significativamente a los 44 metros de profundidad hasta la finalización de la perforación. Además, se identifica montmorillonita en toda la columna a partir de los dos metros de profundidad en baja concentración.

5 GEOMORFOLOGÍA, HIDROLOGÍA Y SUELOS

5.1 Marco Geomorfológico Regional

La zona centro y nororiental de Argentina es esencialmente llana, caracterizada por un bajo relieve relativo y por la ausencia o escasez de afloramientos rocosos antiguos en su mayor parte, resultado del accionar conjunto de diferentes procesos geomorfológicos a lo largo de la historia evolutiva (Pereyra, 2018).

La región que involucra la provincia de La Pampa se caracteriza por depósitos eólicos que se extienden desde el pie de la Cordillera de los Andes hasta la costa del Océano Atlántico, que según Zárate y Tripaldi (2012), en el área de interés domina la unidad de campos de dunas de la pampa central, donde las principales geoformas son dunas lineales de 100 a 130 km de largo, 2 a 3 km de ancho y un relieve relativo de alrededor de 2 m, cuya orientación indicaría que los vientos pasados eran preferentemente del SO. A partir de fósiles localizados en una duna al oeste de la provincia de Buenos Aires, estos autores definieron que la acumulación eólica fue activada durante el Pleistoceno tardío.

Durante esta última época y el Holoceno, surgen alternancia de períodos húmedos y secos a nivel regional que permitieron el modelado del relieve. Durante el Pleistoceno, la región estaba sometida a un régimen climático de extrema aridez y sobre su superficie circulaban aguas de ablación glacial a través de valles, dado que en la cordillera se desarrollaban extensas glaciaciones. A medida que los valles fueron desconectados por desvíos, variaciones de caudal, etc., por motivos climáticos, quedaron sometidos a procesos de erosión eólica. Las partículas movilizadas conformaron dunas longitudinales compuestas que cubrieron el paisaje fluvial preexistente (Malagnino, 1989), que posteriormente fueron fijadas por vegetación al ser sometida la región a un régimen de mayor humedad.

Un período seco en el Holoceno inferior/medio, generó la removilización de las dunas preexistentes, formando un sistema de dunas megaparábolicas, con un máximo desarrollo al sur de la provincia de Buenos Aires, que posteriormente fueron fijadas por un nuevo régimen húmedo. En la Figura 45, se observa que el área de estudio estaría conformada por dunas longitudinales compuestas del Pleistoceno, las cuales se aprecian en detalle en la Figura 46, y dunas longitudinales del Holoceno superior.

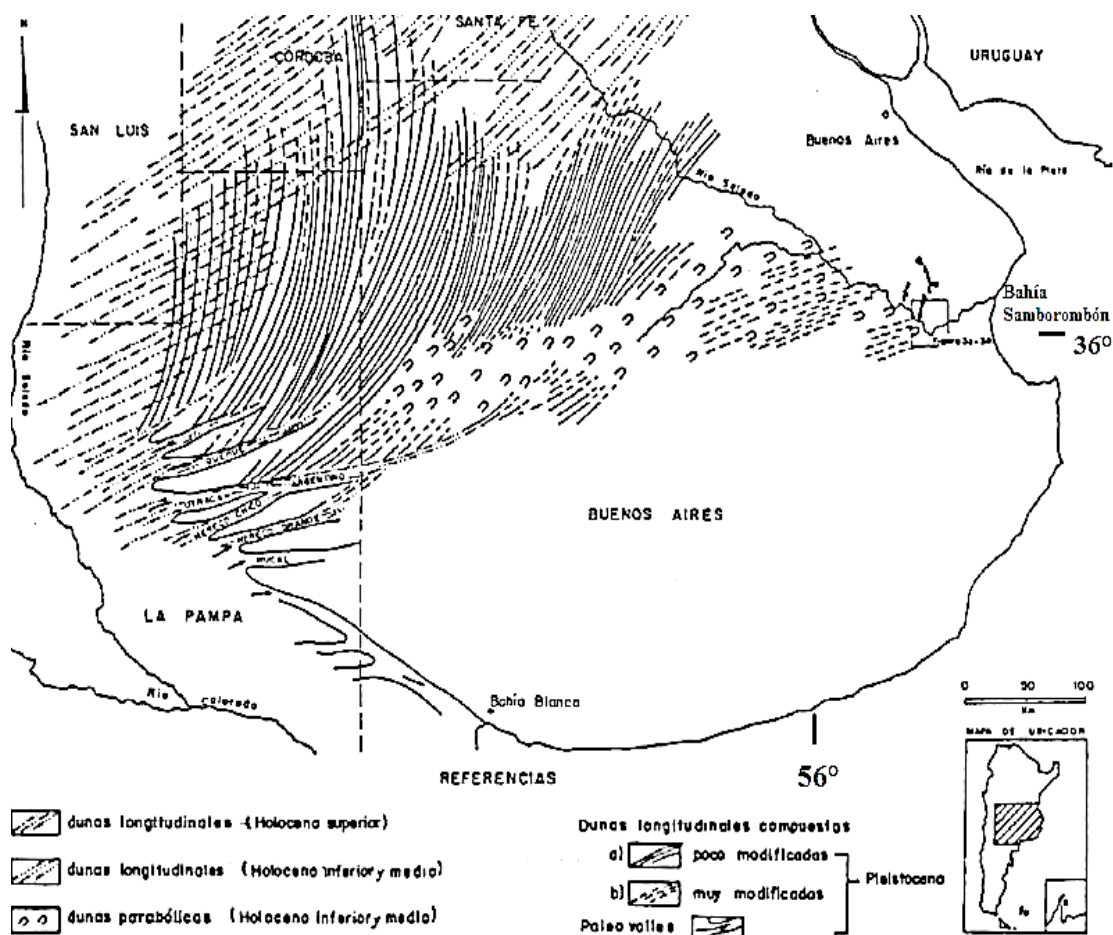


Figura 45. Paleoformas de origen eólico propuestas por Malagnino (1989).

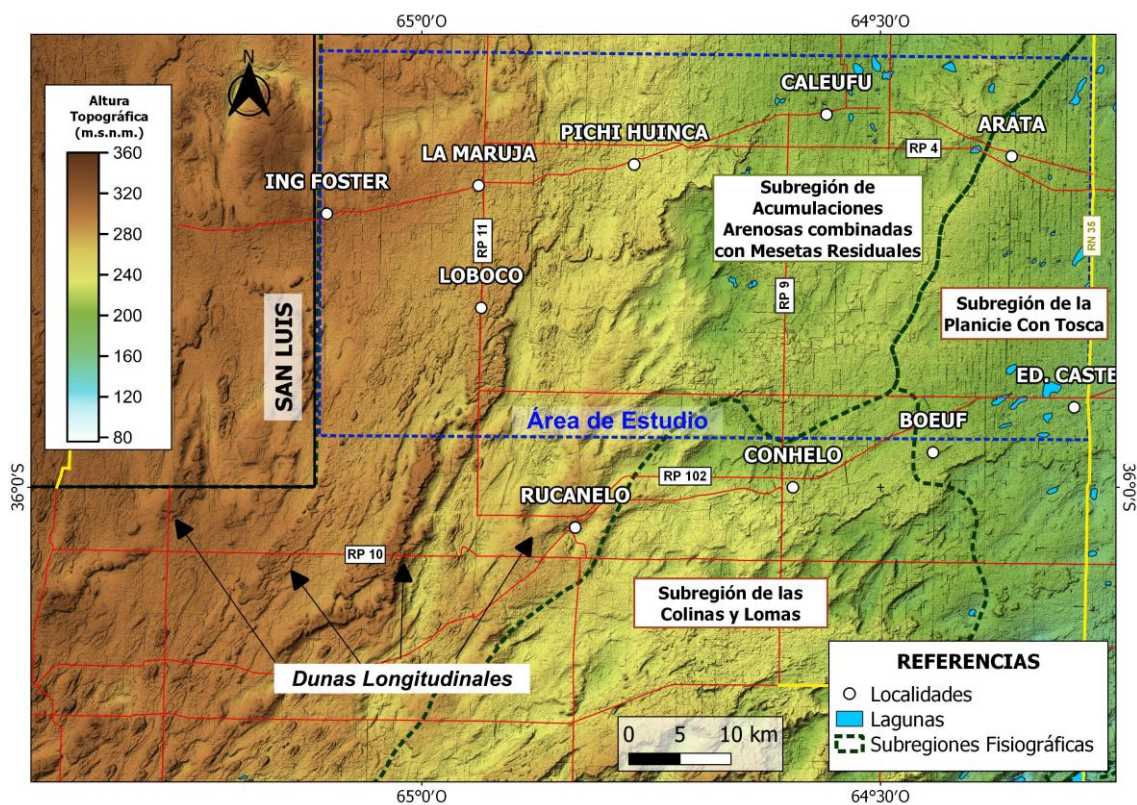


Figura 46. Detalle de las dunas longitudinales del área de estudio.

En la provincia de La Pampa, uno de los primeros estudios lo presenta Salazar Lea Plaza (1980) a partir de un mapa geomorfológico, identificando los principales factores y procesos formadores del paisaje. Posteriormente, en 1996, Calmels presenta una caracterización geomorfológica definiendo distintas unidades que se describirán en el siguiente apartado.

5.2 Geomorfología Local

Calmels (1996), en el Bosquejo Geomorfológico de la Provincia de La Pampa, define al área de estudio dentro de la unidad denominada “Llanura pampeana de modelado eólico superimpuesto”, una de las más extensas dentro del territorio pampeano, cuya mayor peculiaridad es contar con un manto de arena en superficie de espesor muy variable e ininterrumpido (0,4 y 15 m). Esta área presenta un modelado en superficie adquirido por el viento y sus acciones eólicas intensas, dando origen a diferentes geoformas (médanos, planicies arenosas, ondulaciones). Esta unidad presenta un gradiente regional de O-E, en general inferior a 1%.

Dentro de esta llanura, Salazar Lea Plaza (1980) distingue dos unidades geomorfológicas denominadas: “de las acumulaciones arenosas combinadas con mesetas residuales” hacia el oeste y “de la planicie con tosca” al este. En la Figura 47 se observan las curvas de nivel del área de estudio con una equidistancia de 20 m, donde se aprecia hacia el oeste isolíneas que dibujan sectores más elevados y con una distinguida longitud alineados en dirección N-S, característica de esta planicie longitudinal, donde también se encuentran zonas de acumulaciones arenosas (médanos). Hacia el este se observa un patrón preferentemente paralelo entre las curvas topográficas cuya altura descende desde NO-SE, característica de esta planicie de bajo relieve, formándose lagunas temporarias en zonas de baja altura topográfica principalmente en épocas húmedas. La mayor altura topográfica se localiza hacia el oeste del área con un valor aproximado de 307 m s.n.m., mientras que los valores más bajo de elevación se hallan en el extremo este con un valor próximo a los 187 m s.n.m.

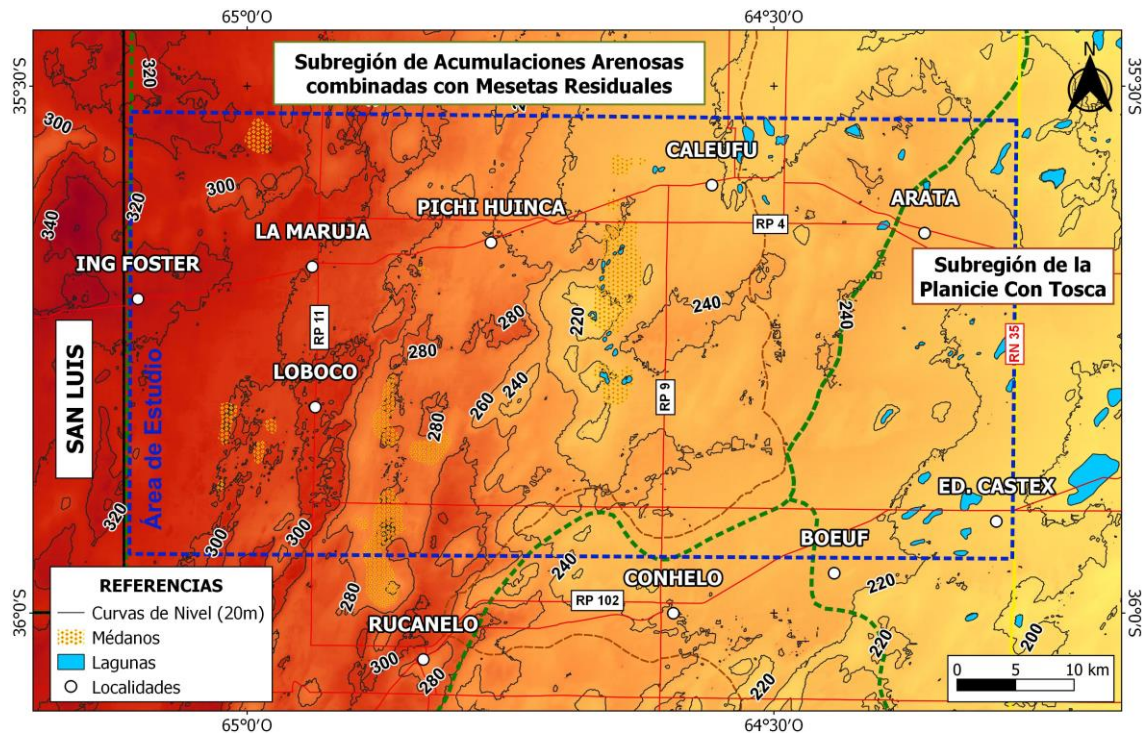


Figura 47. Mapa geomorfológico del área de estudio.

5.2.1 Unidad Geomorfológica de las Acumulaciones Arenosas combinadas con Mesetas Residuales

Esta planicie ondulada ocupa el oeste del área de estudio, abarcando 2.406 km², cuya característica principal son las acumulaciones de arena y las geoformas que predominan como médanos, planicies arenosas, etc. (Foto 17 y Foto 18), y la presencia de mesetas residuales aisladas con orientación preferencial NE-SO y planicies calcáreas (Foto 19). No se distinguen líneas de drenaje importantes, sólo algunas cubetas que permanecen con agua en períodos húmedos.



Foto 17. Planicie ondulada de la unidad de las acumulaciones arenosas combinadas con mesetas residuales.



Foto 18. Médanos fijados con vegetación en la unidad de las acumulaciones arenosas combinadas con mesetas residuales.



Foto 19. Meseta residual con tosca en la unidad de las acumulaciones arenosas combinadas con mesetas residuales.

5.2.2 Unidad Geomorfológica de la Planicie con Tosca

Es una planicie uniforme suavemente ondulada que ocupa 1.904 Km² del este del área de estudio, con una pendiente regional igual que la unidad anterior, de O-E con valores que rondan un 1,3%. No se registran líneas de drenaje de importancia. Una de las principales características es la presencia de una costra calcárea (Foto 20 y Foto 21) originada por acción hídrica de escurrimiento difuso ocurrido en el pasado, sobre la cual se depositó posteriormente un manto arenoso eólico (Salazar Lea Plaza, 1980). También es propio de esta unidad encontrar una capa de ceniza volcánica de 5 a 15 cm de espesor, relacionada con la erupción del volcán Quizapú (35° 39,5' 6"S; 70° 45,8' 12"O), ocurrida en Chile en 1932, transportadas por acción eólica.



Foto 20. Afloramiento de tosca en la unidad de la planicie con tosca.



Foto 21. Tosca en superficie en la unidad de la planicie con tosca.

5.3 Hidrología superficial

Como se mencionó anteriormente, el área de estudio está constituida por zonas de llanura, por lo que el desarrollo de una red de drenaje superficial definida no es posible dada a la escasa pendiente regional, formándose una denominada red de drenaje anárquica. Estas zonas de llanura permiten en sectores deprimidos por el accionar del viento (cubetas de deflación) la formación de lagunas de origen subterráneo, o lagunas que surgen de la acumulación de agua de lluvia luego de precipitaciones intensas, relacionadas a la ocurrencia de excedentes hídricos. En períodos de fenómenos climáticos extremos es común que surjan anegamientos muy prolongados en el tiempo como resultado de la difícil condición de drenaje por distintos factores: la falta de escurrimiento dada la escasez de pendiente topográfica, la capacidad evapotranspirante de la región que no es suficiente para compensar el excedente hídrico, la presencia de tosca que dificulta la infiltración en el suelo,

y el cambio de uso en el suelo generado por el factor antrópico. La escasa pendiente no permite que se genere un escurrimiento canalizado, sino que se manifiesta en forma de manto. Durante las épocas de importantes inundaciones registradas principalmente en los años 1996, 2001 y 2017 (descriptas en el capítulo 3 de Climatología), se registró un aumento de los niveles piezométricos como consecuencia del excedente hídrico provocado por las precipitaciones extremas (Jensen *et al.*, 2000; Kruse *et al.*, 2006; Dillon *et al.*, 2017).

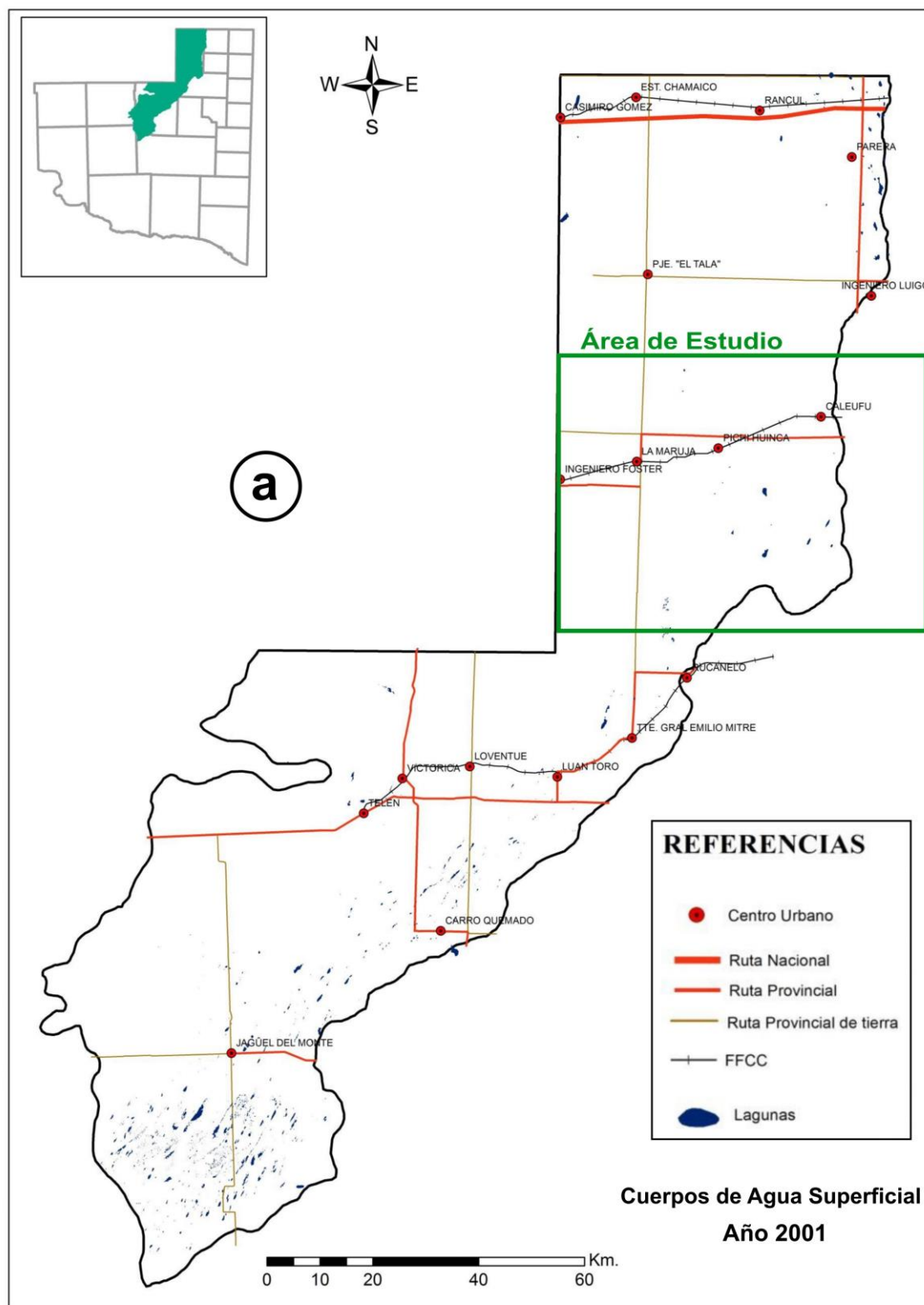
El área de estudio presenta en mayor medida lagunas generadas por excesos hídricos, y se ha demostrado que en períodos húmedos se genera un aumento de la cantidad de cuerpos de agua superficial, y un incremento de su extensión areal, ocurriendo lo contrario en períodos secos (UNLPam, 2015). En las Figura 48 y Figura 49 se observan las dos regiones involucradas: Región de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1) y la Región de la Planicie Pampeana Central (R2); detallando y comparando el número de lagunas y extensión a partir de dos escenarios pluviométricos contrastantes, uno de 2001 considerada una época húmeda y el otro correspondiente al año 2009, representando una época de sequía (Tabla 4). De acuerdo a la permanencia de estos cuerpos superficiales en ambos años, UNLPam (2015) diferenciaron cuatro tipos de lagunas: permanentes, semipermanentes, temporarias y temporarias menores.

De la misma manera, realizaron una distinción de lagunas según sus características geomorfológicas y relación con el nivel freático en el área de estudio, describiendo por un lado las lagunas en áreas de intermedanos, que responden de forma directa al régimen pluviométrico y a la descarga de agua subterránea, por lo que abundan en años húmedos debido al ascenso del nivel freático pero en años secos reducen su extensión o se evaporan totalmente (semipermanentes o temporarias); y por el otro, las lagunas como nivel de base de sistemas hídricos, que se alojan preferentemente en cubetas de deflación y funcionan como zona de descarga del flujo subterráneo. En épocas de excedentes hídricos se activa una leve escorrentía superficial hacia esta zona de descarga del sistema hídrico. Para el área de estudio se efectuó un mapa con la distribución de los cuerpos de agua según las distintas regiones que abarcan y la ubicación aproximada de los sistemas hídricos que involucra (Figura 50).

Tabla 4. Cantidad de lagunas y su extensión areal en una época húmeda (2001) y otra seca (2009) de las dos regiones hídricas que involucran el área de estudio. Extraído de UNLPam (2015).

Región	Tipo de Lagunas	Cantidad de Lagunas	Superficie Total (Ha) 2001	Superficie Total (Ha) 2009
R1: Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos	Permanente	101	1450	570
	Semipermanente	16	488	

Región	Tipo de Lagunas	Cantidad de Lagunas	Superficie Total (Ha) 2001	Superficie Total (Ha) 2009
	Temporaria	293	4035	
	Temporaria Menores		321	
TOTAL		410	5973	570
R2: Planicie Pampeana Central	Permanente	17	8695	1877
	Semipermanente	333	36257	
	Temporaria	1063	20532	
	Temporaria Menores	1918	5562	
TOTAL		3331	71046	1877



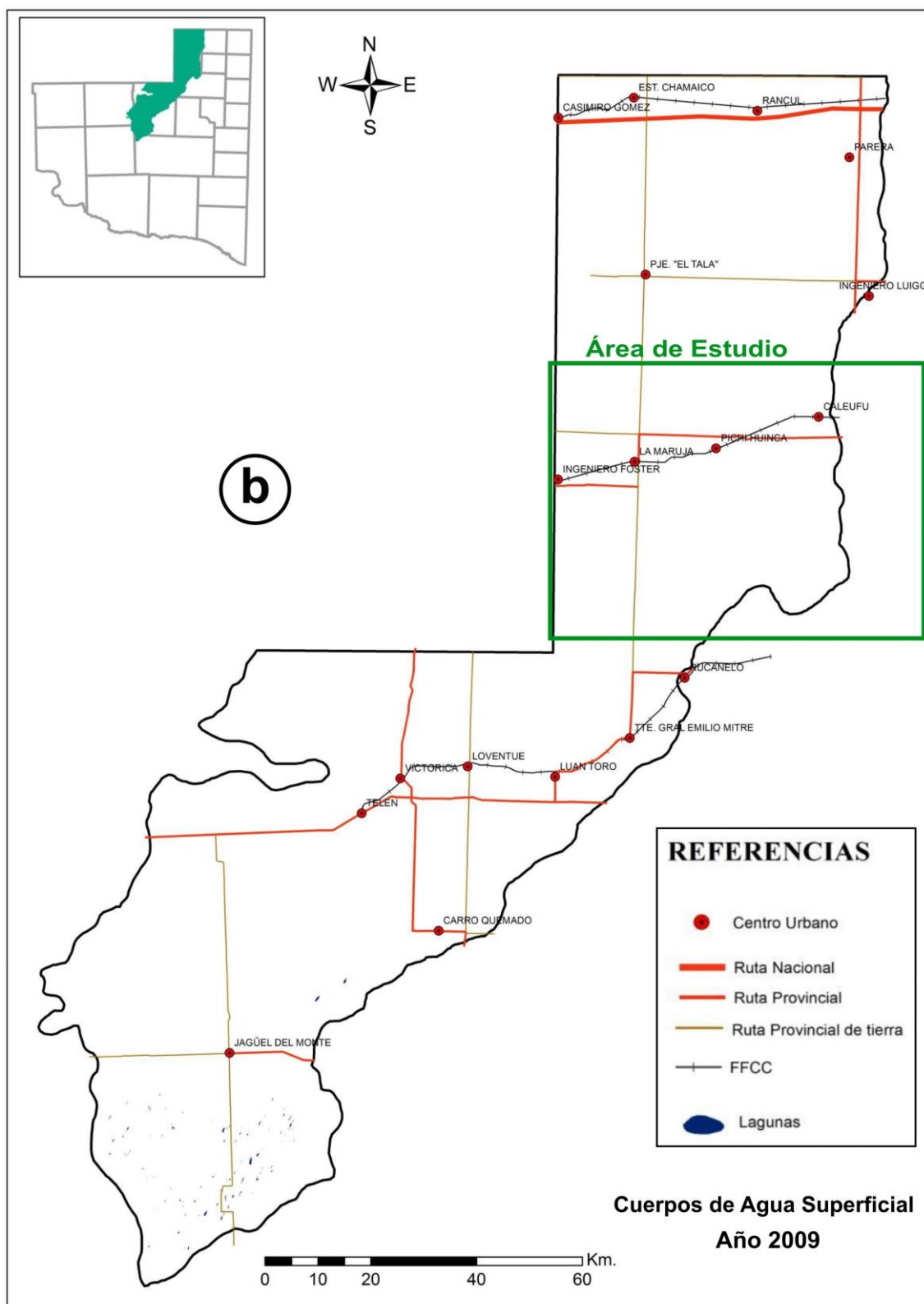
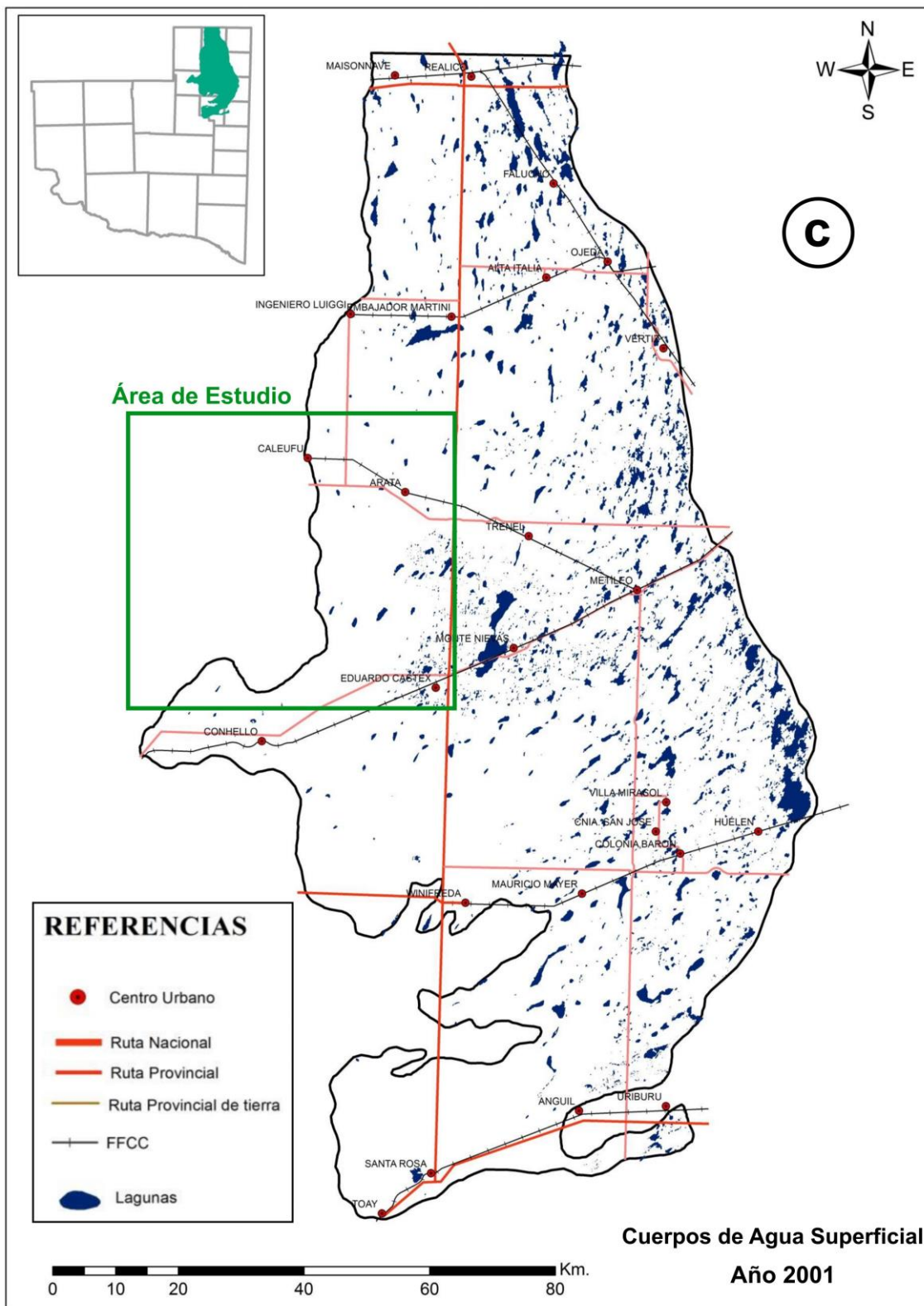


Figura 48. Distribución de lagunas en la Región Hídrica de Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1): a) época húmeda (2001); b) época seca (2009). Extraído y modificado de UNLPam (2015).



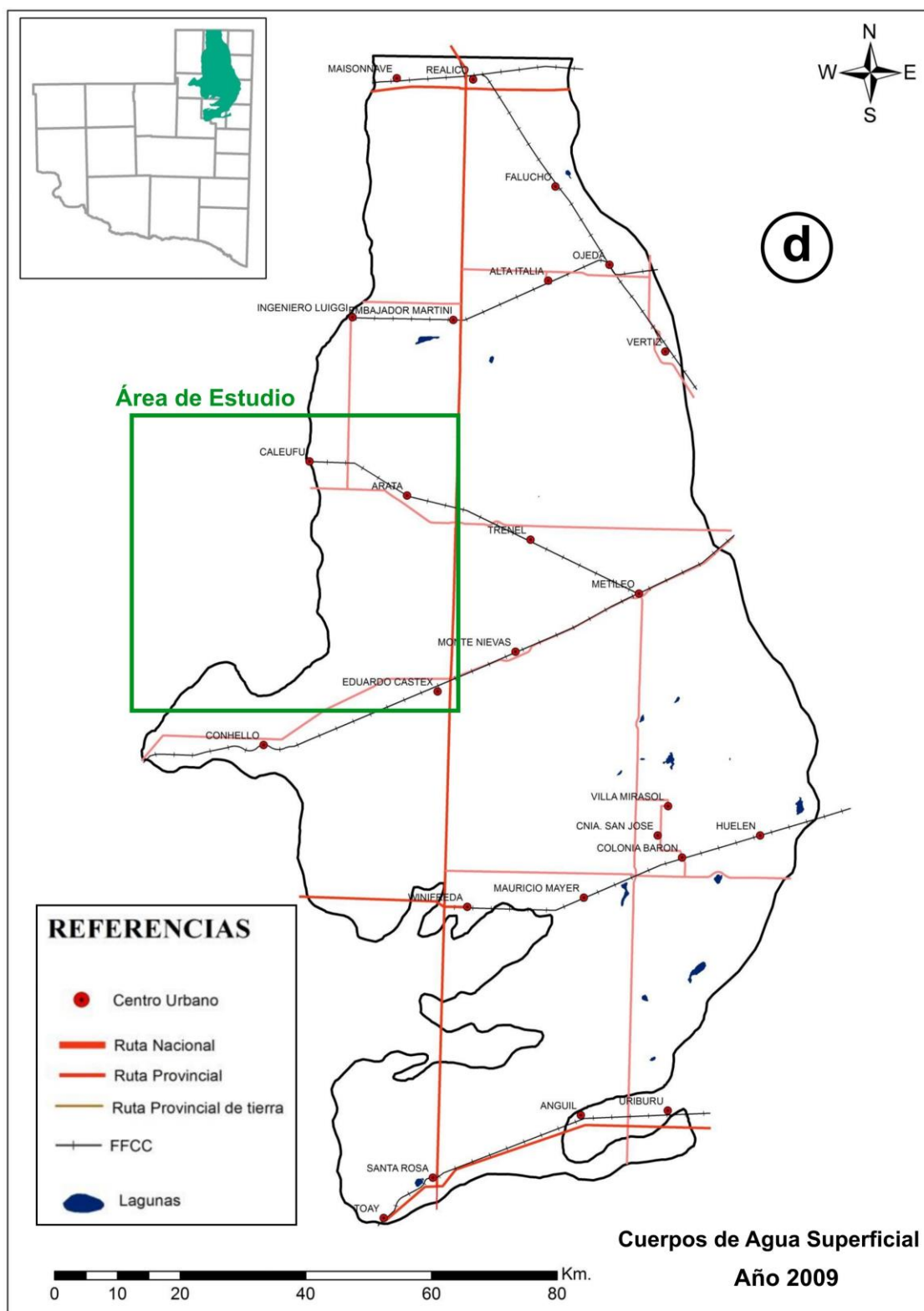


Figura 49. Distribución de lagunas en la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central (R2): c) época húmeda (2001); d) época seca (2009). Extraído y modificado de UNLPam (2015).

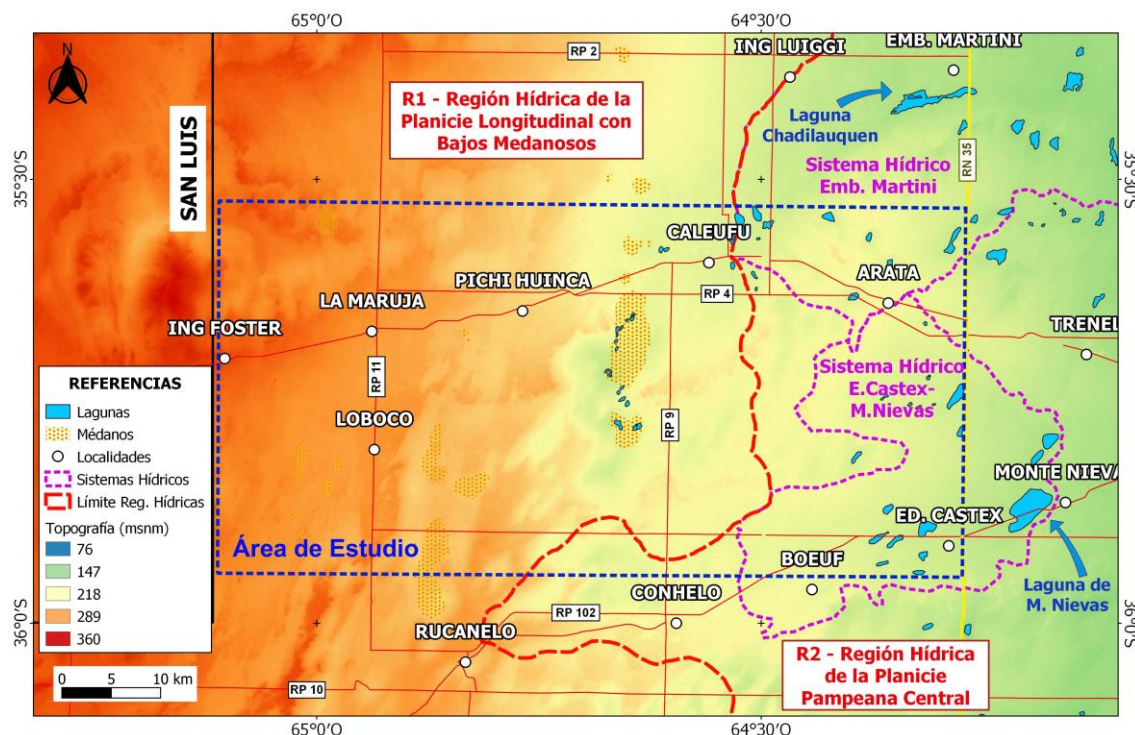


Figura 50. Distribución de los cuerpos de agua permanentes y temporarios que abarca el área de estudio dentro de las Regiones Hídricas.

La región R2 (Figura 49) presenta una dominancia de lagunas temporarias, presentando un área total de 71.046 Ha en una época húmeda, en contraste con 1.877 Ha en una época de sequía, que representaría la superficie ocupada por lagunas permanentes. El número de lagunas temporarias y temporarias menores alcanzaron un total de 1.063 y 1.908 respectivamente, en el año 2001. En esta región predominan las lagunas que actúan como nivel de base de sistemas hídricos, de gran extensión, entre las cuales se encuentran la laguna de Chadilauquen, las lagunas de las inmediaciones de Monte Nieves y la de Bajo de Bárbulo, conformando tres diferentes sistemas hídricos. El área de estudio abarcaría los primeros dos sistemas mencionados (Figura 50).

La laguna de Chadilauquen ($35^{\circ}24'49''\text{S}$; $64^{\circ}19'42''\text{O}$) (Foto 22) se localiza al sur de la localidad de Embajador Martini ($35^{\circ}23'11''\text{S}$; $64^{\circ}16'57''\text{O}$), de carácter permanente, de gran salinidad ya que es una zona de descarga subterránea, y ha alcanzado una superficie de 1.137 Ha. En épocas húmedas recibe el escurrimiento superficial desde todos los sentidos, incluyendo el sector NE del área de estudio, zona entre las localidades de Caleufú y Arata. Por su parte, las lagunas de las inmediaciones de Monte Nieves se encuentran al norte y oeste de la localidad homónima ($35^{\circ}51'57''\text{S}$; $64^{\circ}11'37''\text{O}$), son de carácter permanente, y reciben escurrimiento superficiales desde el oeste, lo que sería el sector SE del área de estudio, cercano a Eduardo Castex e inmediaciones y sur de Arata. Específicamente en el área de estudio se encuentran lagunas mayormente temporarias y temporarias menores, numerosas en épocas de

abundantes precipitaciones, que forman parte principalmente del sistema hídrico Eduardo Castex-Monte Nieves (Figura 50).



Foto 22. Laguna de Chadilauquen, zona de descarga del Sistema hídrico de Embajador Martini, dentro de la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central.

La región R1 (Figura 48) por su parte, presenta grandes diferencias entre el sector norte y el sur, presentando una escasez de lagunas principalmente en el norte, verificando sólo muy pocas y de carácter temporario (de épocas húmedas), relacionadas al área de médanos que limita la región por el este (UNLPam, 2015). La gran mayoría de las lagunas se localizan al sur, formando parte del sistema hídrico del Meauco, fuera del área de estudio. El número de lagunas permanentes, semipermanentes y temporarias no presentan una diferencia tan acentuada como la región anterior. Las lagunas temporarias durante el año húmedo 2001 alcanzaron un total de 293, mientras que la cantidad de lagunas semipermanentes y permanentes fueron un total de 16 y 101 respectivamente. En relación a la existencia de menor cantidad de lagunas temporarias, no se observa una variación acentuada en la superficie inundada entre un período húmedo y uno seco como en la región anterior, alcanzando valores 5.973 y 570 Ha respectivamente. Dentro del área de estudio se observan sólo lagunas de carácter temporario, típicas de áreas de intermédanos, que sólo ocurren en épocas de excesos hídricos, y en épocas de sequías al descender el nivel freático desaparecen, como ocurrió en el año 2009.

Es importante destacar que las lagunas distribuidas en el área de estudio se encuentran sometidas a diferentes usos antrópicos, entre ellos, el principal involucra actividades productivas dentro del margen de la ganadería y agricultura, y usos secundarios como estabilizadores de efluentes y/o receptores de precipitaciones.

5.4 Suelos

Los suelos predominantes en el área de estudio son Haplustoles, destacándose del tipo éntico principalmente, seguido por los tipos árido y torriorténtico (Figura 51). El material parental de estos suelos está constituido principalmente por loess y limos loésicos del Pleistoceno tardío-Holoceno. La composición mineralógica en general es homogénea, pudiendo variar principalmente el contenido de vidrio volcánico (Morras, 2003). El perfil típico de estos suelos Haplustoles se caracteriza por una secuencia de horizontes A-AC-C-Ck, cuyos valores de pH van en aumento a mayor profundidad debido al efecto de acumulación de carbonato de calcio (Buschiazzi y Abascal, 2001).

Según el Inventario Integrado de Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa (Cano *et al.*, 1980), en el área de estudio predominan la Subregión de las Acumulaciones arenosas combinadas con Mesetas Residuales al oeste y la Subregión de la Planicie con Tosca hacia el este. Dentro de la primera se destacan cuatro unidades cartográficas de interés para la zona: a) de los médanos (Tt1); b) de las planicies medanosas con tosca (He2, pt + Tu1); c) de la planicie limoarenosa (Ha2 + He2); d) de la planicie arenolimosas (Hto2). Y de la segunda subregión forman parte las siguientes unidades cartográficas: e) de la planicie Realico-Arata (He2, pt + Ht3); f) de la planicie con tosca de Castex-Winifreda (He2, pt + He2, ptfs).

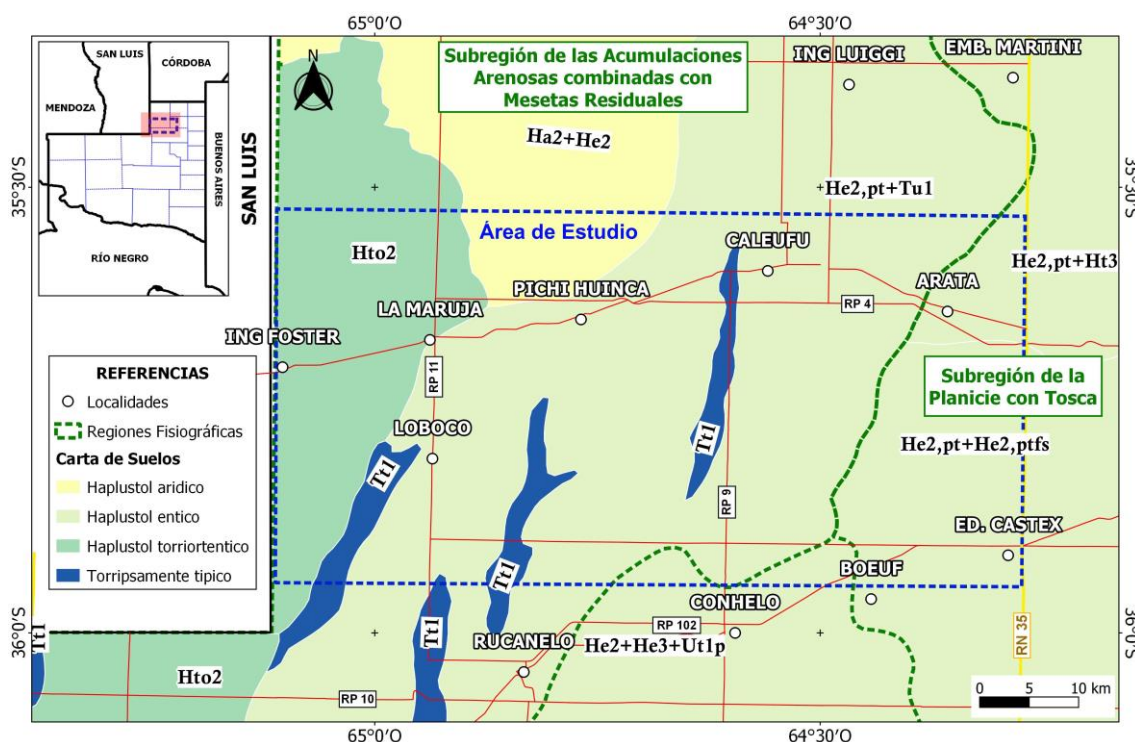


Figura 51. Distribución de los tipos de suelos en el área de estudio según Cano (1980).

Unidad de los Médanos (Tt1): esta unidad se presenta en forma de digitaciones e inclusiones, ocupando parte de los departamentos Rancul y Conchelo al oeste

del área de estudio. Estos suelos son del tipo Torripsamente típico, se encuentran en un régimen de humedad arídico muy próximo al ústico, temperatura térmica y su clase es arenosa. Son susceptibles a la erosión eólica. Son formaciones medanosas recientes de espesor más o menos uniforme, de textura arenosa fina, con un porcentaje del 95% de arena y el resto es limo y arcilla. Tiene una incipiente evolución genética y su perfil es del tipo C o A/C, C. Son de fácil drenaje, alta permeabilidad y baja retención de humedad.

Unidad de las planicies medanosas con tosca (He2, pt + Tu1): abarca la parte central del área de estudio. Las localidades de Pichi Huinca, Caleufú y Rucanelo son áreas características para esta unidad. Son arenas eólicas de reciente deposición que descansan, en discordancia, sobre un manto de tosca. La textura de los materiales superficiales es franco-arenosa fina con 10% de arcilla, 20% de limo y 70% de arena (muy fina y fina). La tosca puede encontrarse desde la superficie hasta debajo de 1,5 m, pero generalmente entre los 0,5 y 1,5 m El perfil es del tipo A1-A/C-C, tiene régimen de humedad ústico, de temperatura térmica y clase de tamaño partícula franco-gruesa. El suelo dominante es Haplustol éntico.

Unidad de la planicie limoarenosa (Ha2 + He2): esta unidad ocupa un pequeño sector al norte de la localidad de Pichi Huinca dentro del área de estudio. El sector sur se caracteriza por un relieve llano con participación de sedimentos limosos. Los materiales parentales corresponden a un sedimento reciente, arenoso, a veces de poco espesor que descansa sobre Formación Cerro Azul. La textura es franca con 20% de arcilla, 35% de limo y 45% de arena (fina-muy fina). El perfil es del tipo A1-A/C-C, tiene régimen de humedad ústico, de temperatura térmica y clase de tamaño partícula franco-gruesa. El suelo dominante es Haplustol arídico.

Unidad de la planicie arenolimosas (Hto2): abarca el sector oeste de la zona de interés, cubriendo la localidad de Ingeniero Foster y alcanzando el pueblo de La Maruja. Corresponde a materiales de reciente deposición, cuya textura es franca arenosa muy fina, con 10% de arcilla, 20% de limo y 70% de arena (fina a muy fina). En general, presentan una leve organización edafogenética, manifestándose en un sencillo perfil. El carbonato de calcio casi siempre se encuentra a partir de 1 m de profundidad. El drenaje es excesivo y el contenido de materia orgánica es moderado. Se encuentra bajo un régimen de humedad ústico, de temperatura térmica y de clase franco gruesa. El suelo dominante se clasifica como Haplustol torriorténtico.

Unidad de la planicie Realico-Arata (He2, pt + Ht3): abarca un pequeño sector al noreste del área de interés, alcanzando la localidad de Arata. Se caracteriza por sedimentos de origen eólico y de textura franco arenosa fina, con 12% de arcilla y 28% de limo total. Estos materiales descansan en discordancia sobre

la tosca, cuya presencia es generalizada en toda la unidad y se encuentra en general entre los 60 y 120 cm de profundidad. El suelo dominante es un Haplustol éntico, familia franco gruesa mixta térmica, con tosca entre los 50 y 150 cm. El perfil típico es A-AC-C- tosca. De manera subordinada se encuentra también un Haplustol típico, familia franca fina, mixta térmica, con presencia de tosca alrededor de los 50 cm de profundidad. Se diferencia del anterior por la presencia de un horizonte B “in situ”, en el cual se observan signos de iluviación (ej. presencia de barnices). En este caso, el perfil típico es A-B cámbico-tosca.

Unidad de la planicie con tosca de Castex-Winifreda (He2, pt +He2, ptfs): abarca una pequeña zona al sureste de la zona de interés alcanzando la localidad de Eduardo Castex. Al igual que la unidad anterior, la tosca se encuentra en toda el área. Los sedimentos son de origen eólico y de textura franco arenosa sobre el manto de tosca que aflora o se encuentra entre los 60 y 120 cm. El suelo dominante es un Haplustol éntico, familia franco gruesa mixta, térmica, con tosca entre los 50 y 150 cm. El suelo subordinado es un Haplustol éntico, familia franco gruesa, mixta térmica, petrocálcica, fase somera (es decir, con tosca a menos de 50 cm). El perfil típico es A-AC-C-tosca.

6 HIDROGEOLOGÍA

6.1 Introducción

El agua subterránea circula a través de los poros o intersticios de las formaciones geológicas que conforman el subsuelo, gobernada principalmente por fuerzas gravitatorias. Por lo tanto, este medio de circulación es el que le otorga, en parte, las propiedades y características hidroquímicas al agua subterránea, y que, en base a su permeabilidad y otros parámetros hidráulicos, está sujeta su capacidad de almacenar y transmitir el agua. Es por ello, que surge la importancia de conocer el medio por el cual circula el agua subterránea.

La provincia de La Pampa se encuentra dividida en 12 regiones y cuencas hídricas (Giraut *et al.*, 2006), de las cuales el área de estudio, como se ha mencionado antes, abarca la Región de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1) hacia el oeste y la Región de la Planicie Pampeana Central (R2) hacia el este. Desde el punto de vista geomorfológico, estas regiones hídricas se corresponden con las mencionadas anteriormente subregiones geomorfológicas de Salazar Lea Plaza (1980) denominadas “Subregión de la Planicie con Tosca” al este y la “Subregión de las Acumulaciones arenosas con Mesetas Residuales” como se observa en la Figura 52. Cabe aclarar que los límites de las regiones hídricas y las subregiones geomorfológicas no son exactamente compartidos, sino que existe una proximidad entre los mismos.

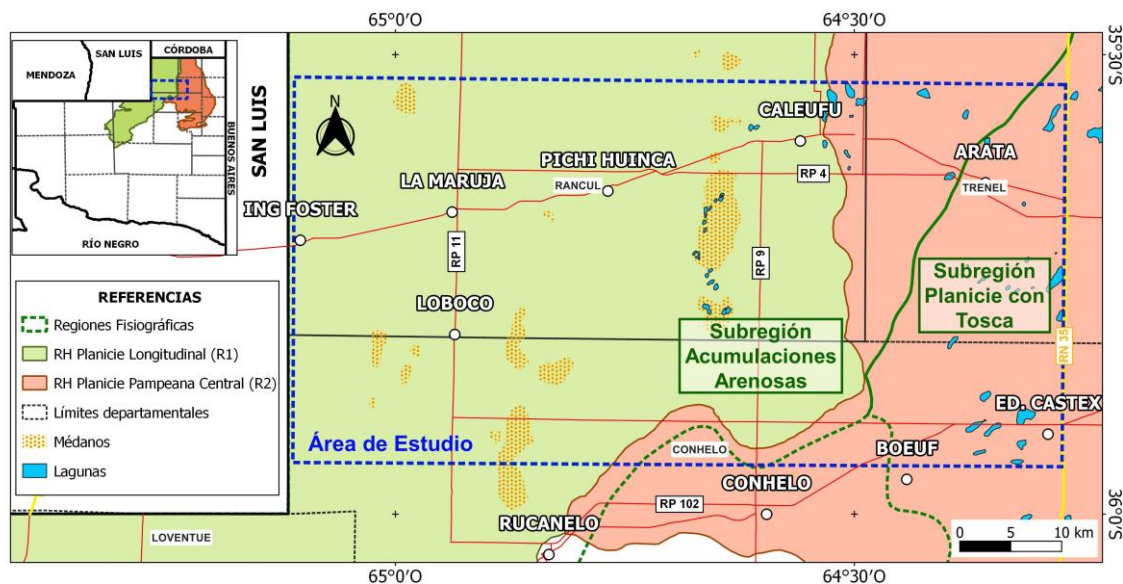


Figura 52. Regiones Hídricas y geomorfológicas que abarca el área de estudio.

6.1.1 Región de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos

La Región de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1) abarca en el territorio pampeano los departamentos de Rancul, oeste de Conhelo, gran parte de Loventué y porcentajes mínimos de Realicó, Chalileo y Utracán. Presenta un relieve ondulado con pendiente baja hacia el este, exhibiendo algunas elevaciones importantes en el extremo noroeste fuera del área de estudio, como el cerro Lonco Vaca.

Respecto a las características hidrogeológicas, y teniendo en cuenta los perfiles litológicos de la región, se destaca una capa de sedimentos arenosos eólicos muy variable e incluso ausente en algunos casos, que forma parte de la Formación Junín, que se destaca en espesor en las zonas de médanos o geoformas arenosas características de la región, actuando como acuíferos libres y pudiendo conformar también acuíferos colgados. Por debajo, se encuentran los sedimentos areno limosos de la Formación Cerro Azul, y este medio de circulación del agua subterránea comienza a presentar características de acuífero libre en la parte superior de la formación ya que predominan las arenas y de acuitardo a medida la textura se vuelve más limo-arcillosa. Considerando que el nivel freático en este sector es generalmente profundo, variando entre los 50 y 125 metros en las perforaciones de las localidades de Ingeniero Foster, La Maruja y Pichi Huinca, el medio de circulación del agua subterránea estaría conformado principalmente por la Formación Cerro Azul, con características de acuífero-acuitardo. Hacia el este de la región, en la localidad de Caleufú, el nivel freático se encuentra menos profundo, aproximadamente entre los 15 y 10 metros, comportándose como un acuífero.

6.1.2 Región de la Planicie Pampeana Central

La Región de la Planicie Pampeana Central (R2) por su parte, se extiende en la zona central del noreste de la provincia, abarcando los departamentos de Realicó, Trenel, Conhelo, oeste de Quemú Quemú y de Maracó. Tiene un relieve de planicie uniforme, ondulada, alternando lomas y depresiones que luego conforman sistemas lagunares temporales en épocas húmedas como respuesta al ascenso del nivel freático, o lagunas permanentes que conforman zonas de descarga de sistemas hídricos como la laguna Chadilauquen o las de Monte Nievas. Una de las características más importantes es la presencia de una costra calcárea tosca cubierta por un manto arenoso de la Formación Junín de origen eólico, suprayacendo a los sedimentos arenosos finos a limosos con concreciones carbonáticas de la Formación Cerro Azul.

Considerando que el nivel freático en esta región se encuentra en el orden de los 10 metros de profundidad, los primeros metros de este sistema se comporta como un acuífero libre, sin embargo hay evidencias en la región que presentan

coeficientes de almacenamiento que denotan un grado de confinamiento (Malán y Ruíz, 1978). La base de este acuífero superior comienza con niveles más arcillo-limosos que se comportan como acuitardos. Por debajo de estos sectores de arcilla y limo hay niveles que presentan nuevamente materiales arenosos finos, que actuarían como acuífero, pero con un cierto grado de confinamiento dado al tipo de materiales que suprayacen (arcillas-limosas).

6.2 Parámetros Hidráulicos

Desde el punto de vista hidrogeológico, resultan de interés los niveles superiores de la columna estratigráfica, es decir, los sedimentos pertenecientes a la Formación Junín y a la Formación Cerro Azul. Ambos se encuentran presentes aunque prevalecen en ambas regiones sedimentos de la Formación Cerro Azul. En base a estudios antecedentes realizados por la APA en el área de estudio, para la Formación Junín corresponden valores de permeabilidad (K) que oscilan entre 10 y 20 m/d (Malán, 1983; Castro, 2013), en tanto que el coeficiente de almacenamiento (S) oscila entre 0,08 y 0,17 (Malán, 1983). El espesor saturado de estos sedimentos es reducido, oscilando entre 2,5 y 6,5 m y disminuyendo o desapareciendo hacia las zonas donde el manto arenoso pierde representatividad (Malán, 1983). En cuanto a los valores recopilados para la formación subyacente, en Intendente Alvear, Castro (2013) calculó una K promedio de 12 m/d, mientras que Malán (1983) para la zona de General Pico informa valores de K promedio entre 1 y 5 m/d, con un S entre 0,001 a 0,005.

Según el Inventario de Recursos Hídricos de la Provincia de La Pampa (UNLPam, 2015), la Región de la Planicie Pampeana Central (R2) cuenta con datos antecedentes de algunos parámetros hidráulicos calculados en perforaciones realizadas para abastecimiento de distintas localidades por diferentes entes estatales como la Administración Provincial del Agua, la Comisión Técnica del Acueducto del Río Colorado, entre otros. Dentro del área de estudio, se registraron valores de transmisividad de 22 y 57 m²/día, correspondientes a las localidades de Arata y Eduardo Castex respectivamente. Por fuera del área de estudio, pero en las inmediaciones, se registró un valor de transmisividad de 300 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0,1 en la localidad de Ingeniero Luiggi (utilizado para cálculos realizados en el capítulo 9 de Recarga). En la localidad de Trenel, ubicada a 21 km. hacia el este de Arata, se encontraron valores de K de 1,89 m/d y de S de 0,0015. En la Región Hídrica de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1), la información dentro del área de estudio es mucho más escasa. El estudio de la UNLPam (2015) registró valores de transmisividad de 4 m²/día para la localidad de Caleufú, sin contar con valores de coeficiente de almacenamiento en la zona de interés.

La variabilidad litológica de la columna sedimentaria de la Formación Cerro Azul, incluyendo a la distinta granulometría como al grado de empaquetamiento y/o cementación según las distintas profundidades que se consideren, ha determinado comportamientos hidráulicos dispares en los ensayos efectuados por distintos autores. Al sumar a estas cuestiones geológicas, el variable grado de eficiencia de los pozos, es de esperar que los resultados de los ensayos difieran ampliamente (Malán, 1995).

7 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

7.1 Marco Teórico

En proyectos de prospección de terrenos, con el objetivo de aportar información sobre características litológicas del subsuelo, espesores y profundidades y sus variaciones a lo largo de un área de interés, es común la utilización de métodos geofísicos indirectos, que junto a información geológica existente permite inferir la composición del subsuelo.

La respuesta del terreno al método geofísico elegido dependerá justamente de su composición y la presencia de contrastes en los cuerpos geológicos a los procesos físicos medidos en cada caso. El contraste entre facies muy conductoras de la corriente eléctrica y los posibles basamentos rocosos pueden ser también detectados.

En todos los casos, las interpretaciones de métodos de prospección indirecta contienen incertidumbres que solo pueden ser despejadas mediante exploraciones directas a través de perforaciones. La información de las perforaciones existentes y sus muestreos de cutting permiten luego reinterpretar los datos geofísicos y ajustar los modelos de manera más conveniente.

Uno de los métodos más expeditivos, económicos y de respetable respuesta a los contrastes indicados en el párrafo anterior, es la prospección geoelectrica. En este trabajo se utilizó el método del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), aplicado en siete sectores del área de estudio a lo largo de una recta proyectada de O-E (Figura 53). Se aplicó el método de Schlumberger, una técnica muy útil para delimitar verticalmente diferentes capas basado en la Ley de Ohm, obteniendo valores de resistividad aparente a partir de las medidas de diferencia de potencial en la superficie, la intensidad de la corriente inducida y del arreglo de los electrodos (de corriente y potencial) y sus distancias, los cuales constituyen una constante geométrica (Figura 54). Todos los sondeos fueron realizados hasta alcanzar una distancia AB de 1000 metros. Finalmente se utilizó el software Ipi2win, en el cual se introducen los valores y la secuencia de separación de AB para lograr las curvas de campo que representan las diferentes capas.

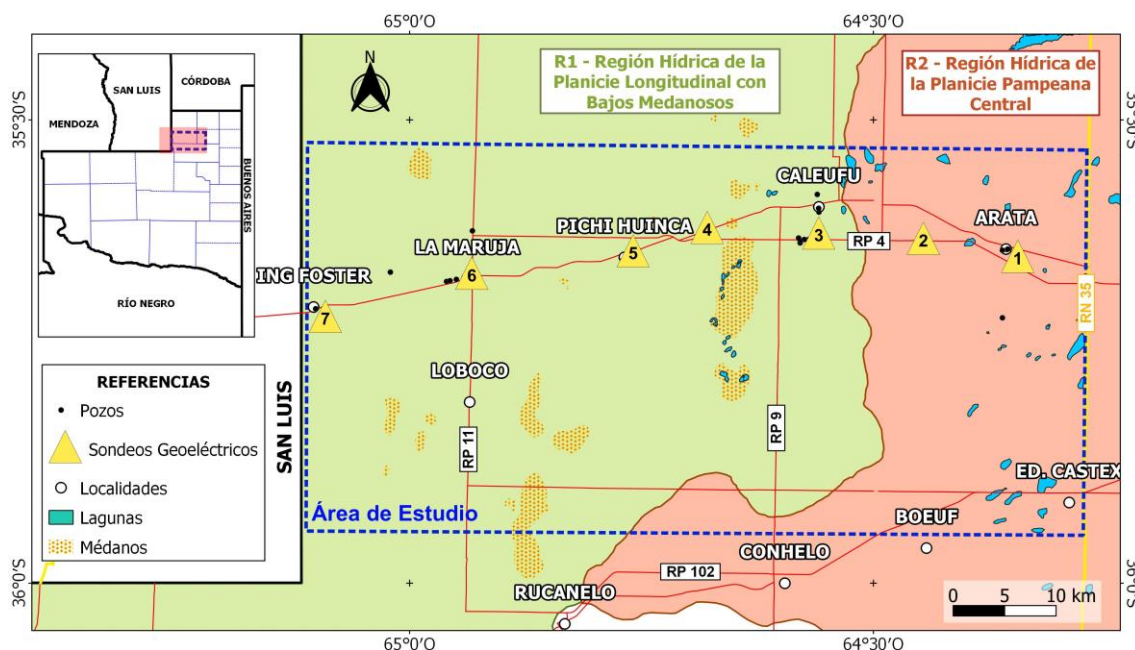


Figura 53. Área de estudio y ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV).

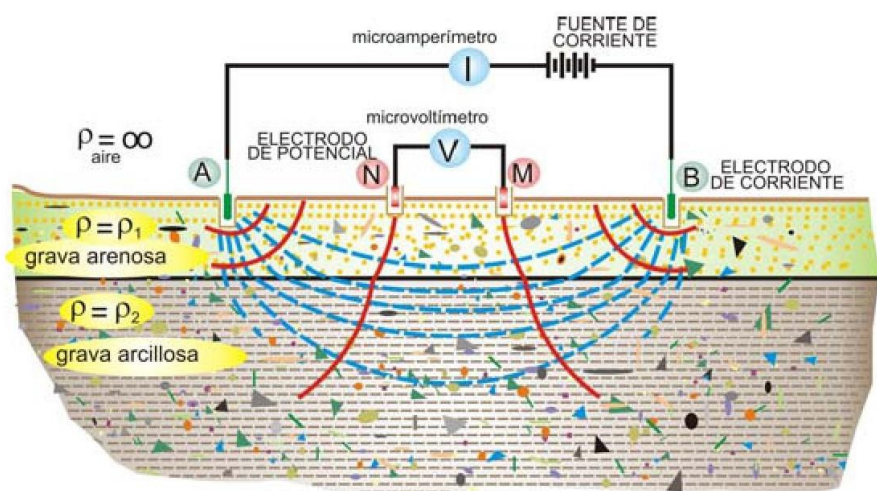


Figura 54. Configuración electródica del método de Schlumberger. Extraído de García Maurizzio (2012).

Para este trabajo se llevaron a cabo 7 sondeos eléctricos verticales (SEVs), cuya ubicación se encuentra detallada en la Tabla 5. En el área de estudio no se cuenta con información de sondeos verticales antecedentes. Para una mejor interpretación se tuvo en cuenta la información de la litología atravesada en numerosas perforaciones realizadas por la Administración Provincial del Agua (APA) en las distintas localidades y por las perforaciones profundas realizadas por DNGM. En principio, en todas las curvas de los SEVs se pudieron definir entre 4 y 5 capas.

Tabla 5: Ubicación de los SEVs realizados en el área de estudio.

SEV	Longitud	Latitud
1	-64,3443	-35,6496

SEV	Longitud	Latitud
2	-64,4462	-35,6303
3	-64,559	-35,6244
4	-64,6793	-35,6185
5	-64,7592	-35,6438
6	-64,9331	-35,6679
7	-65,0909	-35,7145

7.2 Perfiles Geoelectricos

El sentido interpretativo de los modelos 1D se basó en el modelo matemático obtenido a través del programa Ipi2win y la descripción de la litología en cada locación, exceptuando el SEV 4 ya que no se encuentran perforaciones realizadas en sus inmediaciones con información litológica.

A continuación, se presentan los modelos 1D de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados en el lugar. En el corte geoelectrico se presentan los valores de resistividad de cada capa involucrada en el circuito y las profundidades hasta que se extienden cada una aproximadamente según el modelo.

7.2.1 SEV 1 (Arata)

El corte geológico de la localidad de Arata presenta una sucesión de cinco electrocapas (Figura 55 y Tabla 6), y para su interpretación se utilizó la información litológica atravesada en perforaciones cercanas, siendo la más representativa la realizada por la DNGM de 260 m de profundidad, detallada en el perfil de Ceballo (2020) en la Figura 38 del capítulo 4 de Geología. La primera electrocapa presenta valores de 79,5 Ohm.m y se interpreta como facies de limos arenosos ligeramente compactados con cementación calcárea de aproximadamente 1,8 m de espesor. La siguiente electrocapa presenta valores semiconductivos (12 Ohm.m) y su base se encuentra a los 15 m de profundidad asignada a los sedimentos superiores de la Formación Cerro Azul en contacto con agua dulce, ya que se conoce que el nivel piezométrico se encuentra a 16 m. Infrayaciendo se presenta una capa conductiva (5 Ohm.m) que alcanza una profundidad de 115 metros, que se atribuyen a los sedimentos inferiores más finos de la Formación Cerro Azul. Por debajo, una electrocapa semiconductiva (14,6 Ohm.m) que alcanza hasta los 253 m de profundidad, que se podría asignar a la Formación Arata, conformada en sus niveles superiores por arcillas compactas con carbonato, descrita en la litología atravesada en la perforación realizada por la DNGM. La última electrocapa más resistiva (258 Ohm.m) podría estar representada por areniscas finas a medias

con restos carbonosos de los niveles inferiores de la Formación Arata o al basamento alterado.

Tabla 6. Corte Geológico del SEV 1 (Arata).

SEV 1		
Nº Capa	Resistividad ($\Omega.m$)	Profundidad (m)
1	79,5	1,8
2	12,3	15
3	5,35	115
4	14,6	270
5	258	-

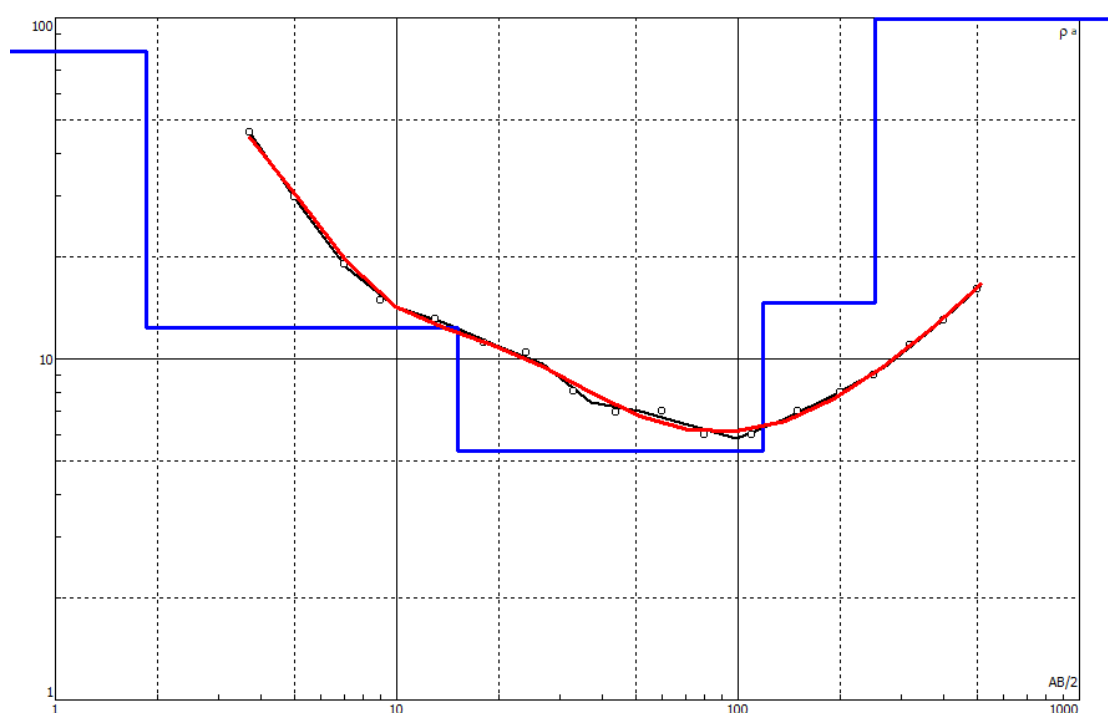


Figura 55. Modelo del SEV 1.

7.2.2 SEV 2 (Escuela Los Hornos)

En el corte geoeléctrico realizado en la Escuela Los Hornos, ubicada a 15 km. de Arata al oeste, se detectaron 4 electrocapas representadas en la Figura 56 y Tabla 7, y para su interpretación se utilizó la descripción litológica de perforaciones de abastecimiento realizadas por la APA que alcanzan hasta los 90 m de profundidad aproximadamente. La profundidad del nivel piezométrico en la zona se encuentra a 50 m aproximadamente, y el contenido de sólidos totales disueltos del agua subterránea alcanza los 4.800 mg/L. La primera electrocapa tiene 1,8 m de profundidad y es semiresistiva (42,9 Ohm.m), asignada a un nivel de arena fina, limo arenoso del Cuaternario. Infrayaciendo se halla una capa que alcanza los 32 m semiconductiva (15,6 Ohm.m),

atribuida a los limos arenosos de la Formación Cerro Azul. Por debajo se encuentra una capa conductiva (5,57 Ohm.m) y que alcanza los 229 m de profundidad, que podría ser asignada a los niveles más finos arcillosos de la Fm Cerro Azul, saturados en agua salobre. En esta última electrocapa podría interpretarse también la posibilidad de detectar los niveles arcillosos superiores de la Formación Arata, considerando la litología descrita en la perforación de la DNGM en la localidad de Arata. La última electrocapa es la más resistiva (230 Ohm.m), y podría representar a las areniscas finas a medias con restos carbonosos de los niveles inferiores de la Formación Arata o al basamento alterado.

Tabla 7. Corte Geológico del SEV 2 (Escuela Los Hornos).

SEV 2		
Nº Capa	Resistividad ($\Omega.m$)	Profundidad (m)
1	42,9	1,8
2	15,6	31,9
3	5,57	229
4	230	-

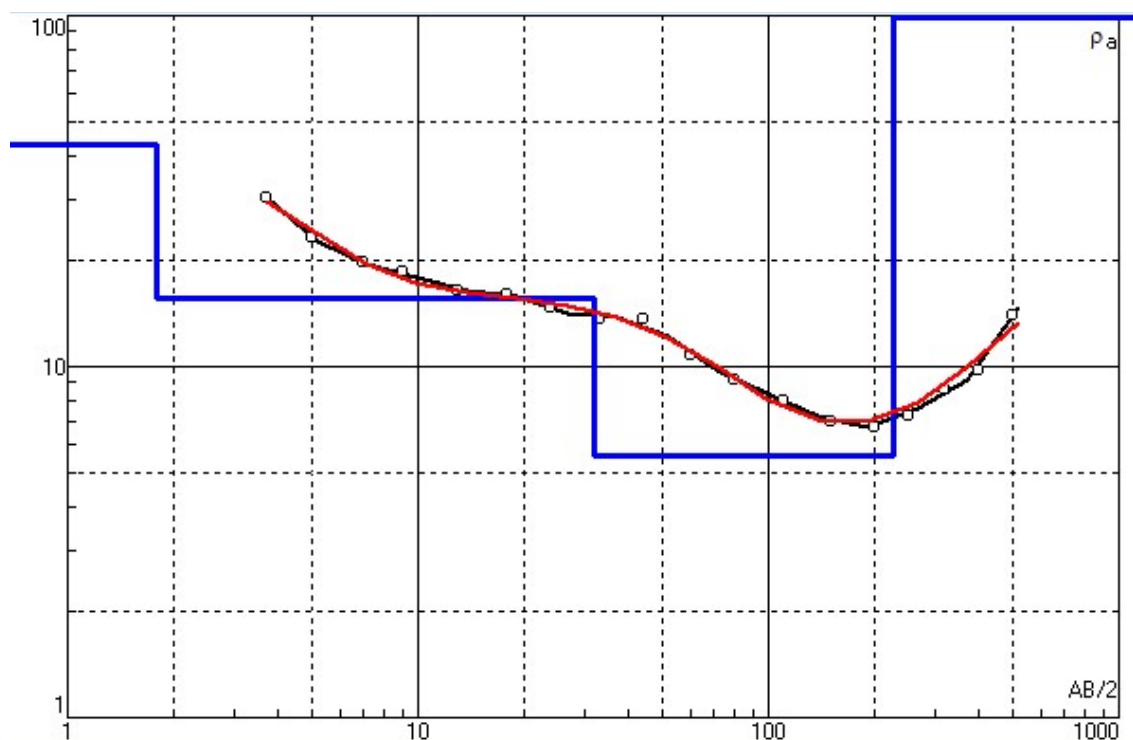


Figura 56. Modelo del SEV 2.

7.2.3 SEV 3 (Caleufú)

El corte geoelectrico del SEV realizado en la localidad de Caleufú, presentó una sucesión de cinco electrocapas (Figura 57 y Tabla 8), y fue interpretado a partir de los perfiles litológicos realizados por la APA que alcanzan sedimentos

de la Formación Cerro Azul hasta los 50 m de profundidad aproximadamente. La primera capa es muy resistiva (325 Ohm.m), tiene aproximadamente 2 metros de espesor y es asignada a un nivel de arena fina a muy fina con fuerte cementación calcárea, compacta (tosca) del Plioceno. La capa infrayacente es semiresistiva (24,7 Ohm.m), alcanza una profundidad de 8,4 m y se la atribuye a la misma unidad pero con menor proporción de cemento calcáreo. La tercera electrocapa es semiconductiva (11,8 Ohm.m) y se extiende hasta los 42,8 m de profundidad y puede estar representada por areniscas finas a limosas de la Formación Cerro Azul saturadas en agua dulce, dado que se conoce que la profundidad del nivel piezométrico se encuentra a los 14 m. Por debajo se encuentra una capa conductiva (7,2 Ohm.m) de gran espesor, que alcanza los 254 m de profundidad, se la podría asignar a los niveles más finos arcillosos de la Fm Cerro Azul, como también a los niveles superiores arcillosos de la Formación Arata, considerando la información litológica de la perforación de la DNGM en la localidad de Arata. La última electrocapa es de carácter resistivo (260 Ohm.m) y podría representar a las areniscas finas a medias con restos carbonosos de los niveles inferiores de la Formación Arata o al basamento alterado.

Tabla 8. Corte Geológico del SEV 3 (Caleufú).

SEV 3		
N° Capa	Resistividad (Ω.m)	Profundidad (m)
1	325	2
2	24,7	8,4
3	11,8	42,8
4	7,16	254
5	260	-

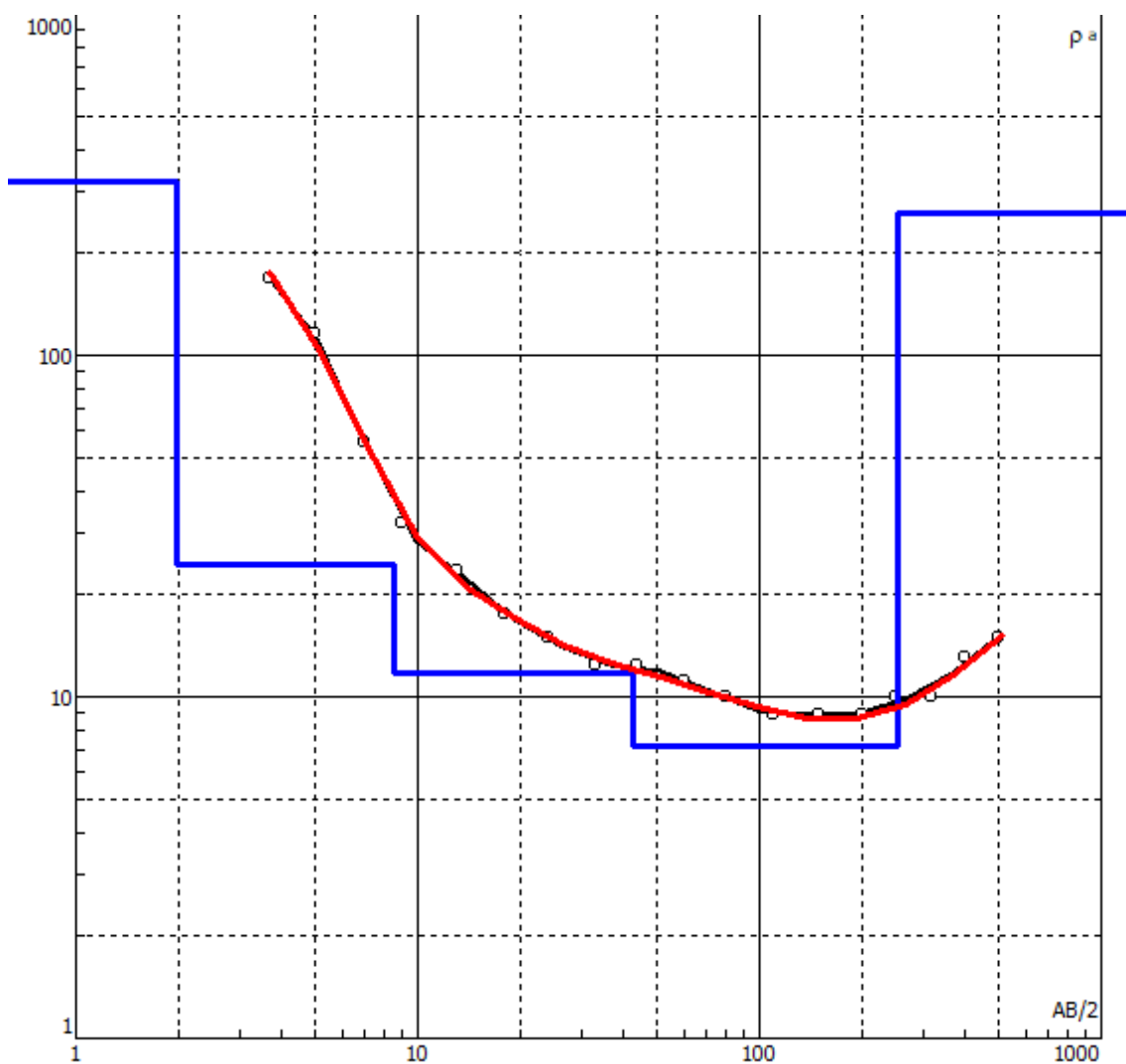


Figura 57. Modelo del SEV 3.

7.2.4 SEV 4 (Entre Caleufú y Pichi Huinca)

Entre las localidades de Caleufú y Pichi Huinca se realizó un SEV del cual se obtuvo un corte geoelectrico de cinco electrocapas (Figura 58 y Tabla 9). No se cuentan con descripciones litológicas en este SEV, por lo que para su interpretación se utilizó información de las localidades más cercanas. La primera electrocapa es de carácter resistivo (179 Ohm.m), tiene 3 metros de espesor y es asignada a un nivel de arenas fina a muy fina con cementación calcárea del Plioceno. La capa por debajo es semiresistiva (55,7 Ohm.m), alcanza una profundidad de 11 m y se la atribuye a la misma unidad pero con menor cementación calcárea. La tercera electrocapa es semiconductiva (11,7 Ohm.m), abarca hasta los 51 m de profundidad y puede estar representada por arenas finas a limosas no saturadas de la Formación Cerro Azul. Hasta los 248 m de profundidad se encuentra una capa conductiva (5,1 Ohm.m) de gran espesor y se la asigna a los niveles más finos arcillosos de la Formación Cerro Azul saturadas posiblemente en agua salobre a salada. En esta última electrocapa se podría interpretar también la posibilidad de detectar los

sedimentos superiores de la Formación Arata dada a la información litológica de la perforación de la DNGM en la localidad de Arata. La última electrocapa es de carácter resistivo (378 Ohm.m) y representaría a las areniscas finas a medias con restos carbonosos de los niveles inferiores de la Formación Arata o al basamento alterado.

Tabla 9. Corte Geológico del SEV 4 (entre Caleufú y Pichi Huinca).

SEV 4		
N° Capa	Resistividad ($\Omega.m$)	Profundidad (m)
1	179	3
2	55,7	11,1
3	11,7	51,1
4	5,1	248
5	378	-

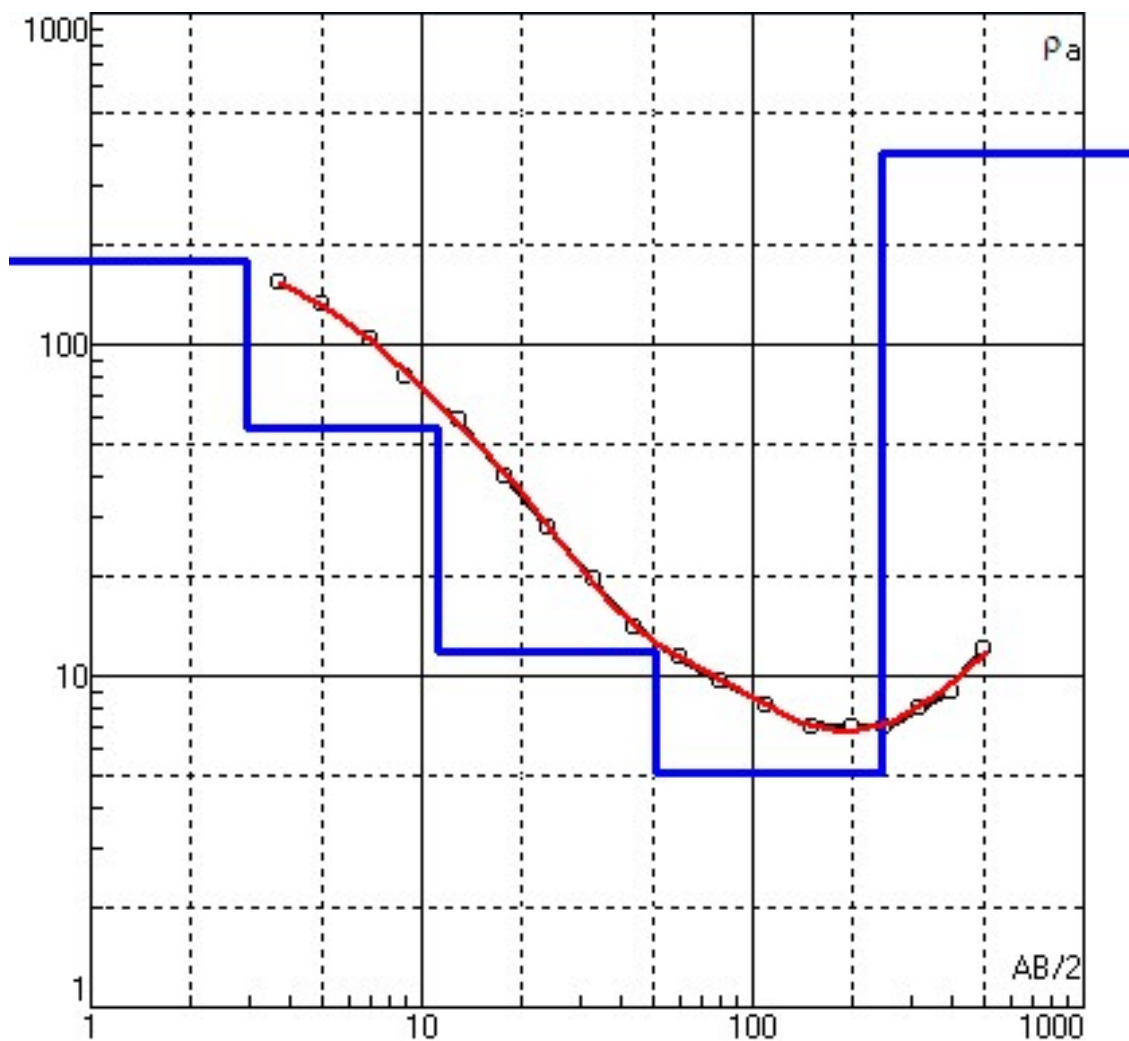


Figura 58. Modelo del SEV 4.

7.2.5 SEV 5 (Pichi Huinca)

El corte geoelectrico de la localidad de Pichi Huinca presenta cinco capas como se observa en la Figura 59 y en la Tabla 10, su interpretaci3n se realiz3 en base a las descripciones litol3gicas de perforaciones realizadas por la APA y la DNGM, las cuales rondan los 100 m de profundidad. La primera electrocapa es de caracteristicas resistivas (204 Ohm.m), alcanza una profundidad de 3,3 m y es asignada a arena fina de matriz pelitica y fuerte cementaci3n calcarea. Infrayaciendo se halla una electrocapa con menor resistividad (103 Ohm.m) hasta una profundidad de 13,5 m, asignada a un nivel de arena fina calcarea que incluye una tosca arenosa muy dura. Por debajo se encuentra una capa semiconductiva (15,2 Ohm.m) que alcanza hasta los 67 m, asignada al Plioceno, conformada por arenas finas limo-arcillosas. La cuarta capa es conductiva (4,4 Ohm.m) con una profundidad de alcanza los 337 m y se la atribuye a niveles superiores de arena limosa, e inferiores de arcilla limosa de la Formaci3n Cerro Azul saturada con agua salobre, dado que se conoce que el nivel piezom3trico se encuentra entre los 55 y 60 m de profundidad aproximadamente y el agua alcanza los 2.400 mg/L de s3lidos totales disueltos. La 3ltima capa es muy resistiva (319 Ohm.m) y podr3a asignarse al basamento alterado.

Tabla 10. Corte Geol3gico del SEV 5 (Pichi Huinca).

SEV 5		
Nº Capa	Resistividad (Ω.m)	Profundidad (m)
1	204	3,3
2	103	13,5
3	15,2	66,9
4	4,4	337
5	319	-

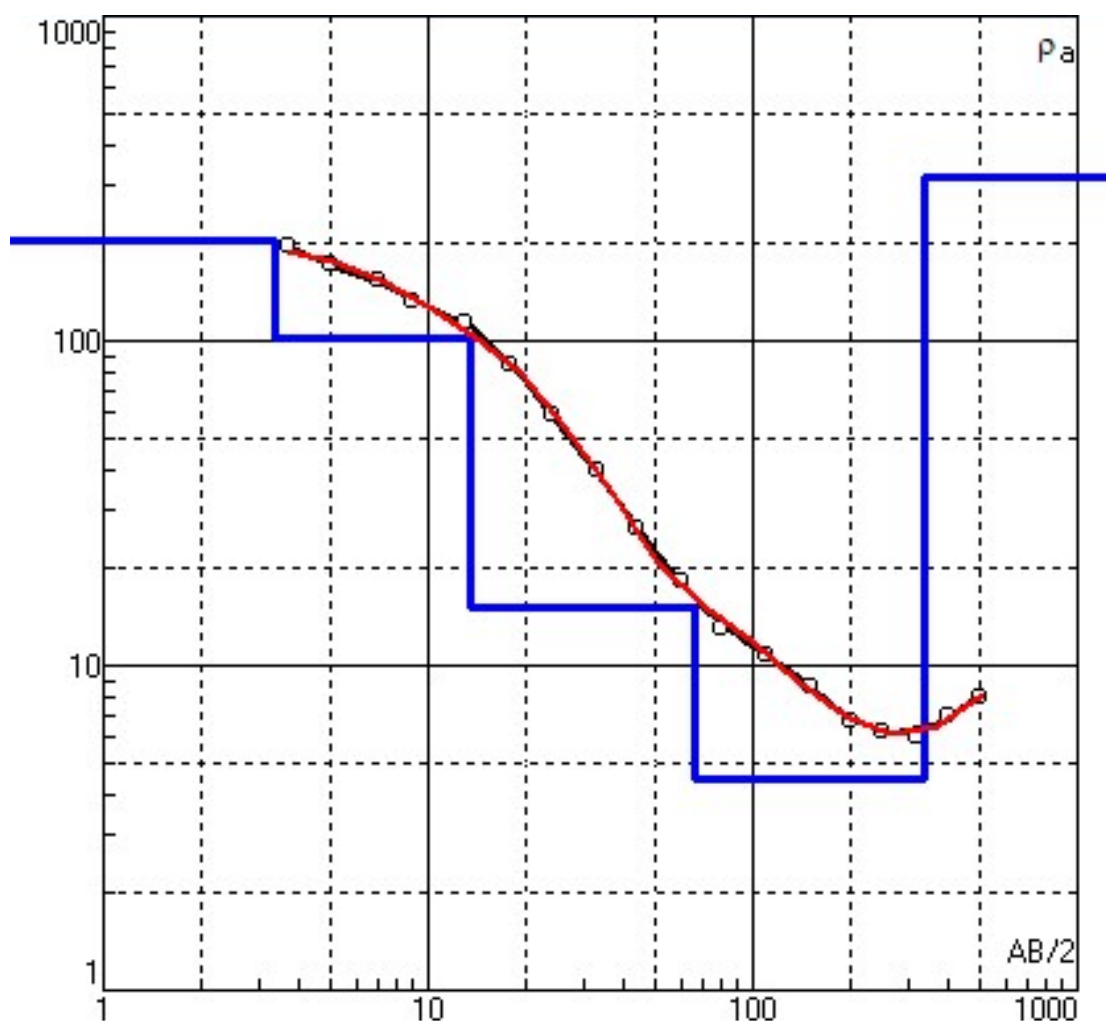


Figura 59. Modelo del SEV 5.

7.2.6 SEV 6 (La Maruja)

El corte geológico correspondiente a la localidad de La Maruja está definido por cuatro electrocapas como se observa en la Figura 60 y en la Tabla 11. Para su interpretación se utilizó principalmente la litología descrita por la DNGM en una perforación realizada en dicha localidad, detallada en el perfil litológico de Ceballos (2020) en la Figura 38 del capítulo 4 de Geología. De Elorriaga y Tullio (1998) definen que en dicha perforación se atraviesan sedimentos de la Formación Cerro Azul hasta los 280 m de profundidad, y de la Formación Macachín hasta alcanzar el basamento a los 700 m de profundidad. La primera electrocapa es la más resistiva (231 Ohm.m), alcanza una profundidad de 6,4 m y se la asigna a sedimentos del cuaternario, margas arenosas, con cementación calcárea. La segunda electrocapa es semiresistiva (30 Ohm.m), alcanza una profundidad de 20 m y correspondería a arena fina a muy fina, limosa también del Cuaternario. Hasta los 125 m se encuentra la tercera capa de características semiconductoras (18,7 Ohm.m) asignada a limolitas arenosas y arcillosas de la Formación Cerro Azul. Por último, la cuarta electrocapa es la más conductiva (3,7 Ohm.m) y se asigna también a la Formación Cerro Azul

pero saturada con agua salobre, considerando que la profundidad del nivel piezométrico se encuentra entre los 90 y 100 m, y el agua subterránea alcanza valores de sólidos totales disueltos de 2.500 mg/L. Conociendo la litología del área, se podría asumir que en esta última electrocapa se encuentra incluida también parte de los sedimentos limos y arenas arcillosos de origen marino de la Formación Macachín.

Tabla 11. Corte Geológico del SEV 6 (La Maruja).

SEV 6		
N° Capa	Resistividad (Ω.m)	Profundidad (m)
1	231	6,4
2	30	20
3	18,7	125
4	3,7	-

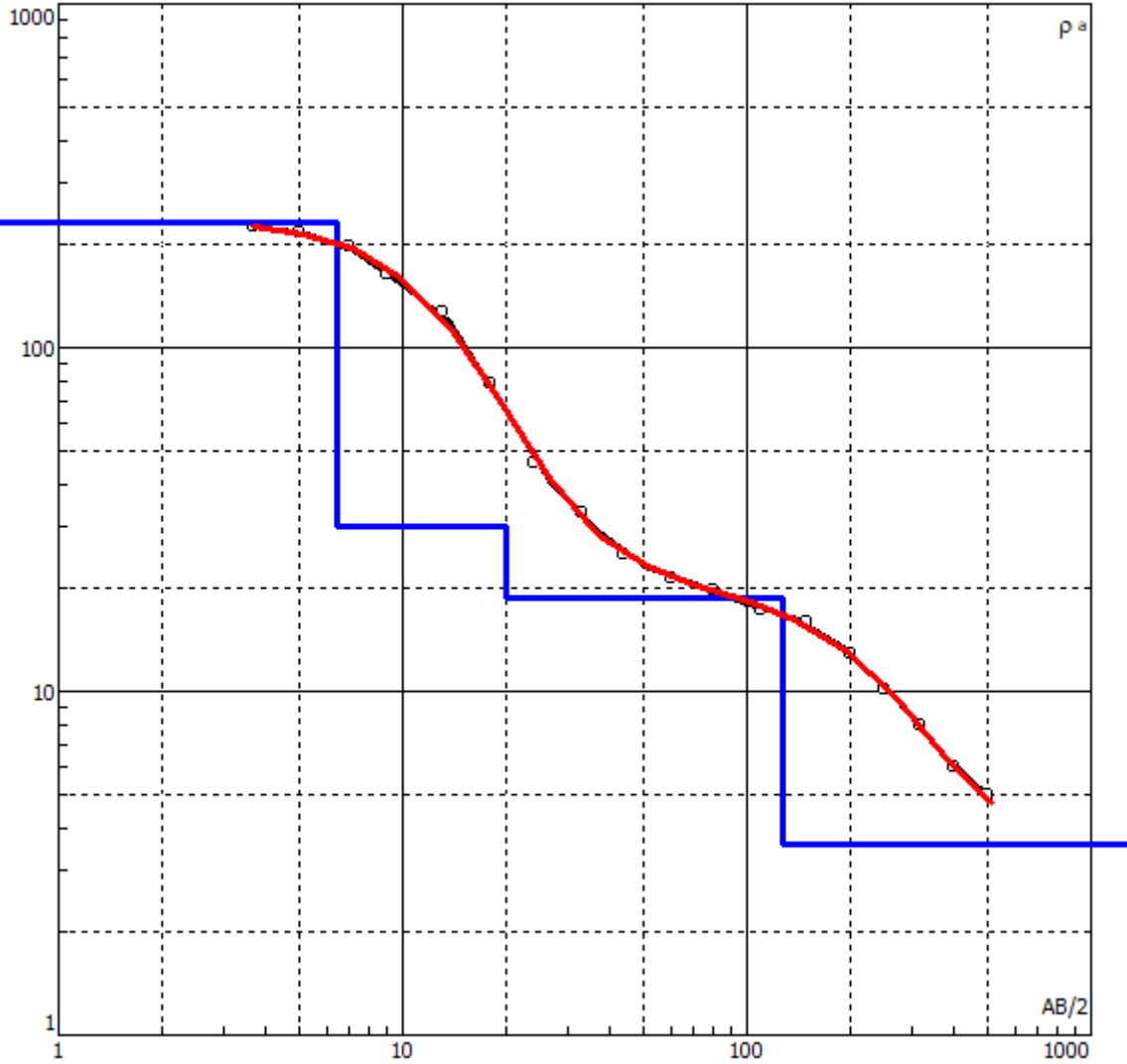


Figura 60. Modelo del SEV 6.

7.2.7 SEV 7 (Ingeniero Foster)

El corte geológico correspondiente al SEV realizado en la localidad de Ingeniero Foster presenta 4 electrocapas de distintas resistividades (Figura 61 y Tabla 12), y su interpretación se realizó teniendo en cuenta las descripciones litológicas realizadas por el APA en dicha localidad en perforaciones de hasta 220 m de profundidad, y la información litológica de localidades vecinas como La Maruja. La primera electrocapa es la más resistiva (200 Ohm.m) de 3,3 m de espesor y representa a arenas media a muy fina con fuerte cementación calcárea. Infrayaciendo se encuentra una electrocapa que alcanza los 15,3 m de profundidad, de carácter semiresistivo (87,1 Ohm.m) que representa sedimentos areno limosos con concreciones calcáreas como mencionan las descripciones litológicas. La tercera capa es semiconductiva (21,7 Ohm.m) y, considerando que alcanza una profundidad de 187 m, se la asigna a niveles superiores de limo areno arcilloso y arena muy fina limosa de la Fm Cerro Azul saturadas con agua dulce, dado que el nivel piezométrico se encuentra entre los 110 y 120 m de profundidad, y el agua subterránea contiene valores de sólidos totales disueltos de 1.000 mg/L. La última capa también semiconductiva (15,3 Ohm.m) es asignada también a limolitas arcillosas de la Formación Cerro Azul. Al igual que en el SEV anterior se podría asumir la posibilidad de asignar la base de la electrocapa a sedimentos de la Formación Macachín.

Tabla 12. Corte Geológico del SEV 7 (Ingeniero Foster).

SEV 7		
N° Capa	Resistividad (Ω.m)	Profundidad (m)
1	200	3,3
2	87,1	15,3
3	21,7	187
4	15,3	-

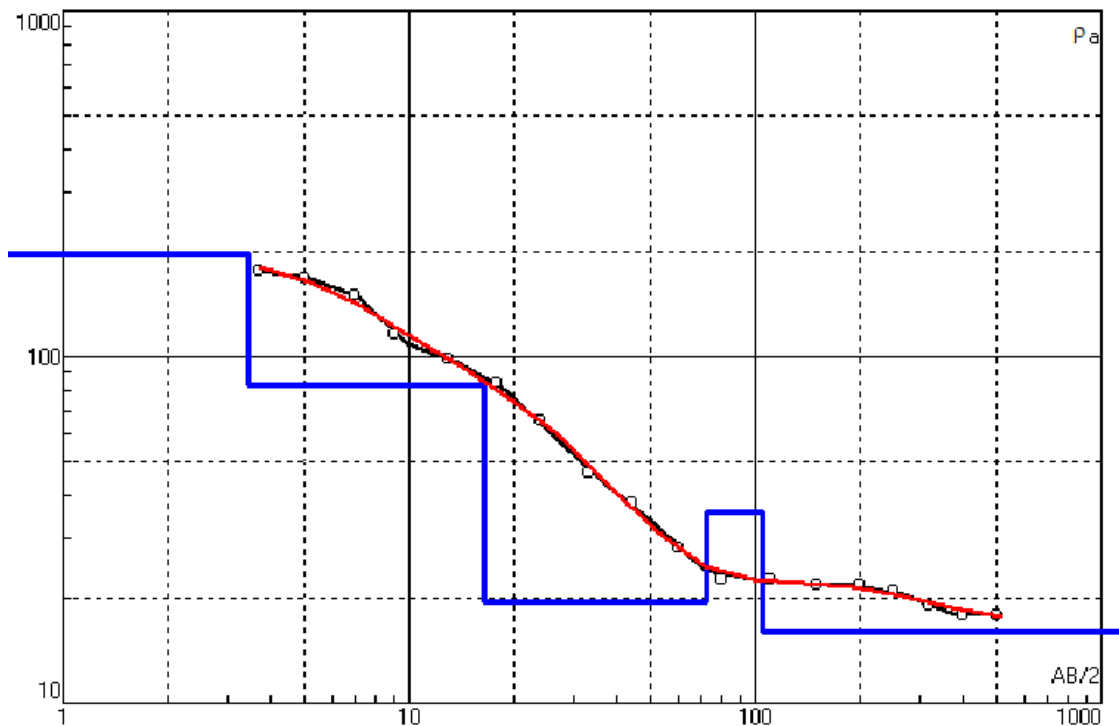


Figura 61. Modelo del SEV 7.

7.3 Interpretación del Perfil Geofísico

El área de estudio es una región de la cual no hay información del detalle del subsuelo. Los estudios más importantes se obtienen a partir de descripciones litológicas de perforaciones realizadas por la Dirección Nacional de Geología y Minería (DNGM) y por la Administración Provincial del Agua (APA), cuyas ubicaciones se encuentran reducidas a las inmediaciones de las localidades de Arata, Caleufú, Pichi Huinca, La Maruja, Ing. Foster y la Escuela Rural Los Hornos.

A partir de la aplicación del método geoelectrico de Schlumberger y de la litología de las perforaciones mencionadas, se pudo detectar entre 4 y 5 capas en cada SEV.

Respecto a los primeros metros de profundidad (2 a 6 m), se observa que desde la localidad de Ingeniero Foster hasta Caleufú se detectan valores resistivos (200 a 325 Ohm.m), los cuales se asignan a arenas finas a media de la Formación Junín (De Salvo *et al.*, 1969), que de acuerdo a las descripciones litológicas, incluye arenas de origen eólico, con cemento calcáreo y un nivel de tosca. Entre los 13 y 20 m de profundidad en estas mismas localidades se detectan valores semiresistivos (30 a 103 Ohm.m) que se asignan también a la Formación Junín pero arenas con características más fina. Entre Arata y la Escuela Los Hornos, los primeros 2 m de profundidad presentan características semiresistivas (43 a 79 Ohm.m) las cuales se designan a depósitos

continentales de textura arenosa muy fina a limosa con cementación calcárea descritos por Rimoldi y Silva Nieto (1999).

Infrayaciendo estas primeras capas, en todos los sondeos se detectan valores semiconductivos (11,7 a 21,7 Ohm.m) los cuales son asignados a la Formación Cerro Azul, constituida por limos arenosos con intercalaciones arcillosas en la parte superior (Llambías, 1975). Posterior a estos valores, entre Arata y Pichi Huinca fueron detectadas capas conductivas (4,4 a 7,1 Ohm.m) que alcanzan profundidades de 229 a 337 m de profundidad, y fueron asignadas a los niveles inferiores limos arcillosos de la Formación Cerro Azul, aunque también se le podría asignar a las arcillas compactas de la Formación Arata (Salso, 1966). En el SEV 1 ubicado en la localidad de Arata, se detecta una electrocapa semiconductiva (14,6 Ohm.m) entre los 115 m y 270 m de profundidad, que considerando la descripción litológica de la perforación de la DNGM, fue designada a la Formación Arata, la cual está integrada por arcillas compactas en niveles superiores y arenas finas en niveles inferiores (Salso, 1966). En el SEV 6 de la localidad de La Maruja se detectan valores conductivos (3,7 Ohm.m) a partir de los 125 m que, según descripciones litológicas realizadas por De Elorriaga y Tullio (1998) de la perforación de la DNGM, podrían asignarse a sedimentos de origen marino de la Formación Macachín que de acuerdo a Salso (1966) está integrada por limos y arenas con intercalaciones arcillosas con alto porcentaje de yeso. No se logra detectar la base de dicha capa, pero según esta información litológica se extendería hasta alcanzar basamento a los 706 m aproximadamente. En el SEV 7 de la localidad de Ingeniero Foster se detecta a partir de los 187 m de profundidad valores de 15,3 Ohm.m, que podrían ser asignados a los niveles inferiores de la Formación Cerro Azul, o posiblemente a los sedimentos de la Formación Macachín.

Subyaciendo a estas capas semiconductivas a conductivas asignadas a las formaciones Cerro Azul y Arata entre los SEV 1 al 5 (entre Arata y Pichi Huinca), se detectan valores resistivos a muy resistivos (230 a 378 Ohm.m), que podría asignarse al basamento, detectándose entre los 229 a 337 m de profundidad. Otro posible supuesto, es que estos valores resistivos a muy resistivos podrían corresponder a areniscas finas a medias con restos carbonosos de los niveles inferiores de la Formación Arata. En los SEV 6 y 7 (La Maruja e Ingeniero Foster respectivamente) no se logró detectar el basamento, dado que según la información litológica de la perforación de la DNGM ubicada en La Maruja, el basamento se localiza a una profundidad de 706 m.

8 HIDRODINÁMICA

8.1 Marco Regional

La hidrodinámica estudia el comportamiento mecánico de los fluidos, en este caso, del movimiento del agua. Este fenómeno sucede por el propio peso del agua, siguiendo las leyes dinámicas de Newton (UNLPam, 2015). El agua se pone en movimiento desde puntos de mayor energía hacia aquellos de menor, como lo indica el teorema de Bernoulli. Esta situación tiene una importancia fundamental al momento de realizar estudios del agua subterránea, para lograr determinar la energía potencial del agua subterránea en el espacio y así definir las direcciones de flujo.

A partir de información antecedente del área, Ceballo (2020) realizó un mapa de equipotenciales que representa el sistema hídrico subterráneo del norte de La Pampa en su contexto regional entre 1980 y 1992 (Figura 62). En este mapa piezométrico regional, si bien no abarca el área de estudio, permite contemplar la circulación regional del agua subterránea en el noreste del territorio pampeano, siendo la dirección del flujo predominante desde el noroeste al sudeste. La zona de recarga regional se encuentra localizada en las serranías de la provincia de Córdoba entre las curvas equipotenciales de 480 y 160 m s.n.m. con gradientes hidráulicos variables entre 0,32% y 0,12%, pasando por una zona de transición que abarca las líneas equipotenciales de 160 y 130 m s.n.m. con gradientes que disminuyen entre 0,13% y 0,05%, hasta una zona de descarga regional conformada en la provincia de Buenos Aires, desarrollada por debajo de la isopieza de 130 m s.n.m., con gradientes hidráulicos menores a 0,05%.

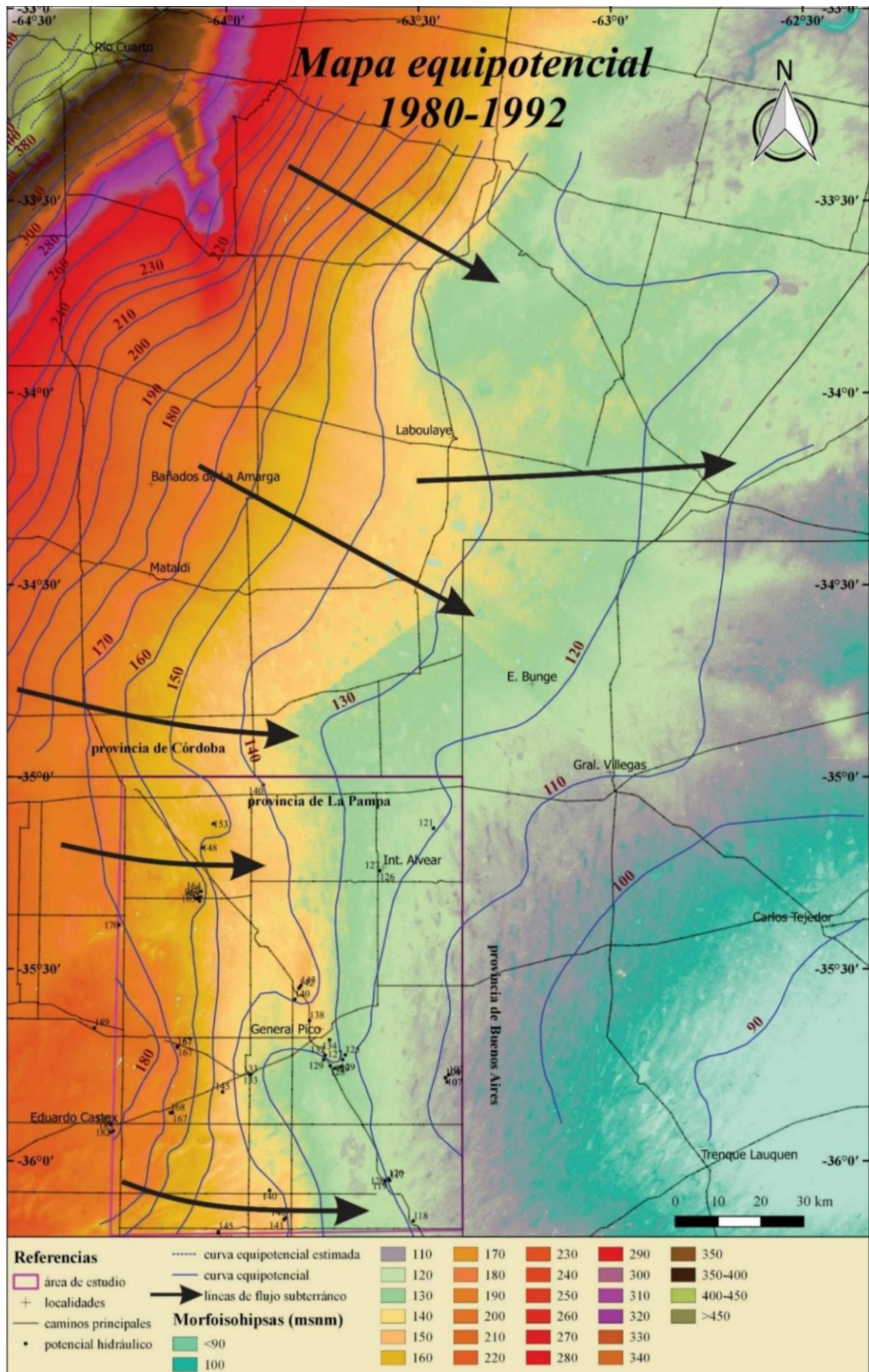


Figura 62. Mapa equipotencial regional. Extraído de Ceballo (2020).

Por otro lado, se cuenta con el mapa piezométrico (Figura 63) realizado en el marco del Inventario de Recursos Hídricos de la Provincia de La Pampa (UNLPam, 2015), realizado en base a información obtenida en campañas de muestreo realizadas durante los años 2014-2015 e información de pozos de abastecimiento efectuados y medidos por la Administración Provincial del Agua en la misma serie cronológica. A partir de este, si bien los autores aclaran que los niveles han sido medidos en distintas épocas y que se encuentran deficiencias respecto a la cantidad y calidad de datos, el mapa logra reflejar el comportamiento regional del agua subterránea en el norte de la provincia de La Pampa.

Este mapa hidrodinámico destaca una componente principal del flujo que indica un movimiento del agua subterránea desde el extremo oeste hacia el este, con gradientes hidráulico que van en descenso al distanciarse en mayor grado las líneas equipotenciales en dirección a Buenos Aires, coincidente con el mapa regional descripto por Ceballo (2020). Se observan algunas direcciones de flujo local en sentido norte-sur sobre el área de estudio, desde la zona de Arata, con mayores potenciales hidráulicos en dirección a la localidad de Conhelo y posteriormente Winifreda, zona de menores potenciales hidráulicos. En esta zona entre Caleufú y Arata se delimita una divisoria de aguas poco desarrollada pero en general el movimiento del agua subterránea es hacia el este, siguiendo el flujo regional.

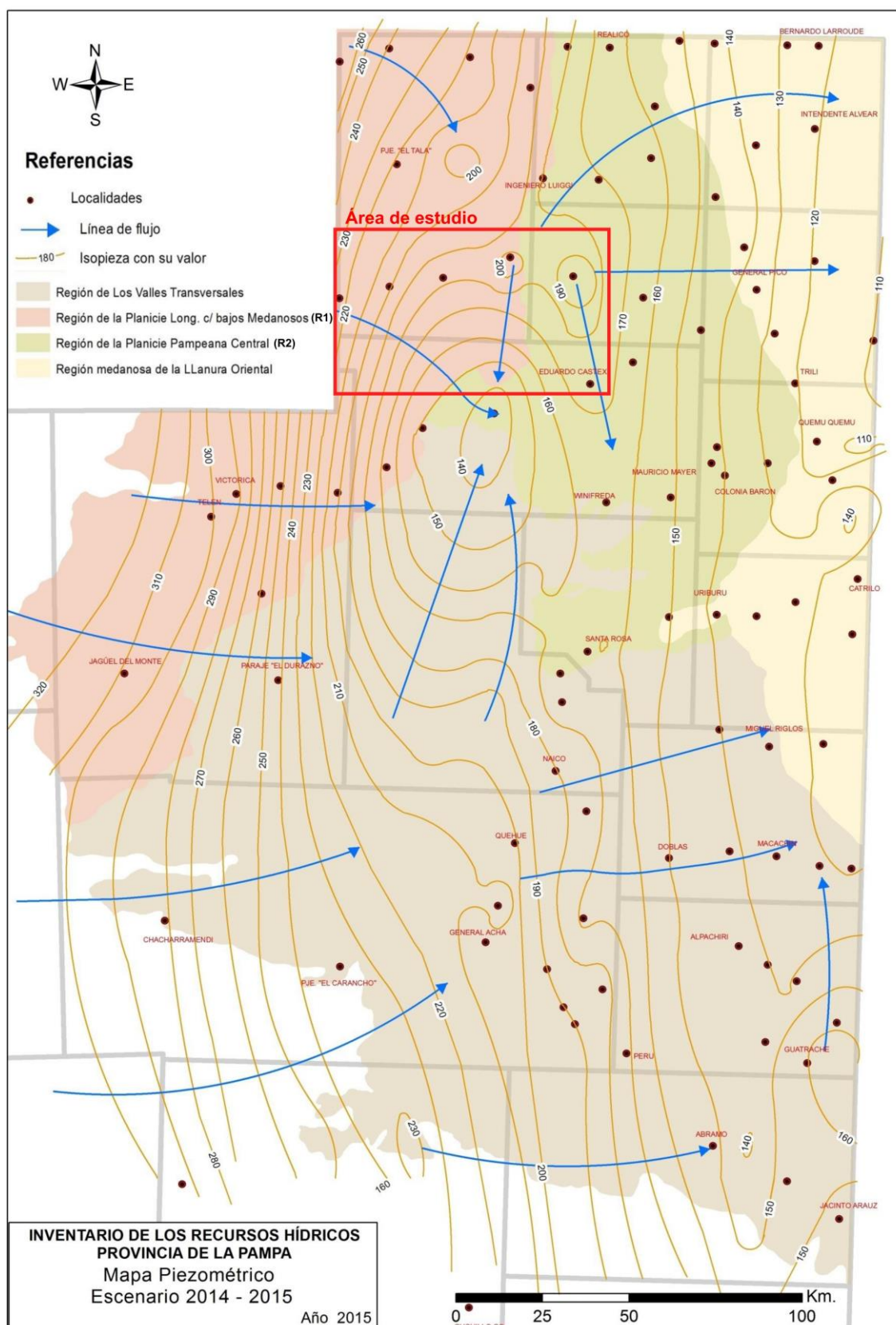


Figura 63. Mapa piezométrico del norte de la provincia de La Pampa para el período 2014-2015. Extraído y modificado de UNLPam (2015).

8.2 Piezometría

Con el fin de efectuar un mapa equipotencial del área de estudio (Figura 66 y Figura 64), durante distintas campañas de campo en el año 2018 se realizaron las mediciones de 38 niveles piezométricos en pozo en distintos establecimientos rurales distribuidos en la zona de estudio, sumando 8 registros de niveles piezométricos en perforaciones de abastecimiento medidos por la Administración Provincial del Agua con fecha cercana al muestreo (Tabla I del Anexo).

Como forma de resumen, se presenta la Tabla 13 con el objetivo de comparar las regiones hídricas que abarca la zona, pudiendo constatar una discrepancia importante entre sí en la profundidad de los niveles piezométricos medidos (Figura 64). En la región R1 el agua subterránea se caracteriza por presentar niveles estáticos profundos, con valores promedios de 60 m y registros máximos de 120 m en el extremo oeste, cercano a la localidad de Ingeniero Foster, y mínimos de 3 m cercano al límite con la región R2. En contraposición, los niveles estáticos de la región R2 se caracterizan por ser más someros, presentando una media de 18 m con registros de profundidades máximas de 93 m en una perforación de la localidad de Conhelo.

Tabla 13. Resumen estadístico para la profundidad del nivel freático (m) en R1 y R2.

Región	n	Media	Máximo	Mínimo	Desvío Estándar
R1	28	60,2	120,9	3,0	32,7
R2	23	18,2	93,5	2,1	21,7

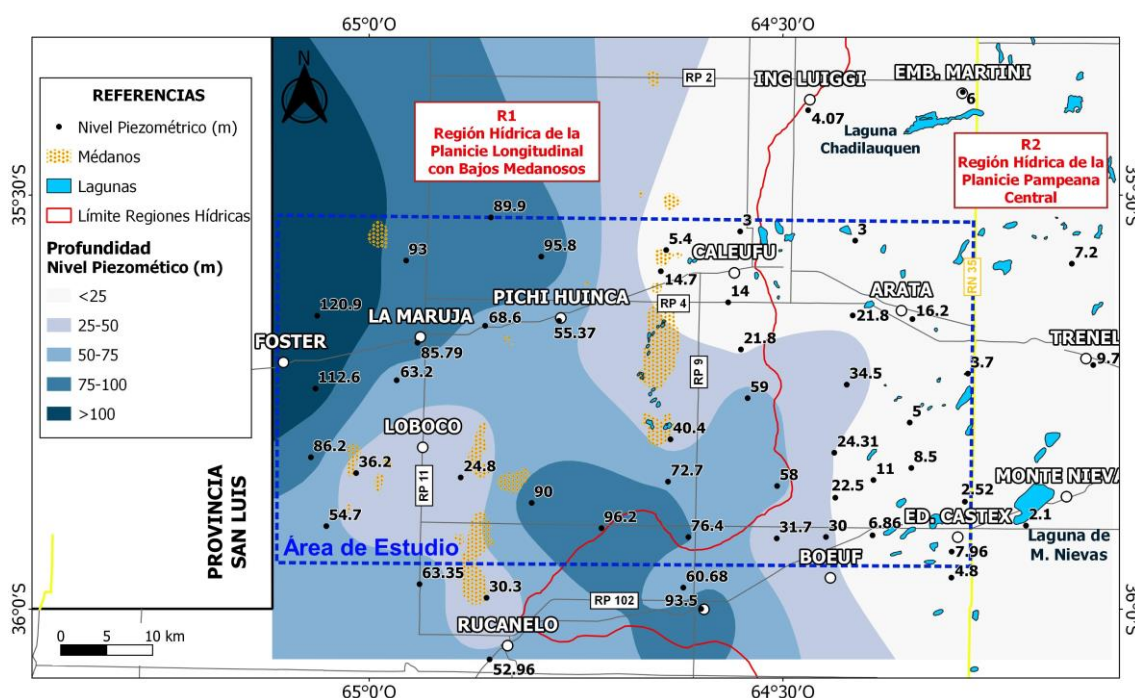


Figura 64. Variación de la profundidad de los niveles freáticos en el área de estudio.

Considerando aquellos pozos con un nivel estático a una profundidad menor de 35 metros como “someros” y aquellos igual o mayor a 35 metros como “profundos”, se puede distinguir que en la región R1 dominan pozos profundos y en la región R2 pozos someros como se observa en la Tabla 14 y en la Figura 65.

Tabla 14. Distribución de pozos en las distintas regiones según la profundidad del nivel freático. Siendo “somero” aquellos <35 m, y “profundos” aquellos >35 m.

Región	Somero	Profundo
R1	7	21
R2	21	2

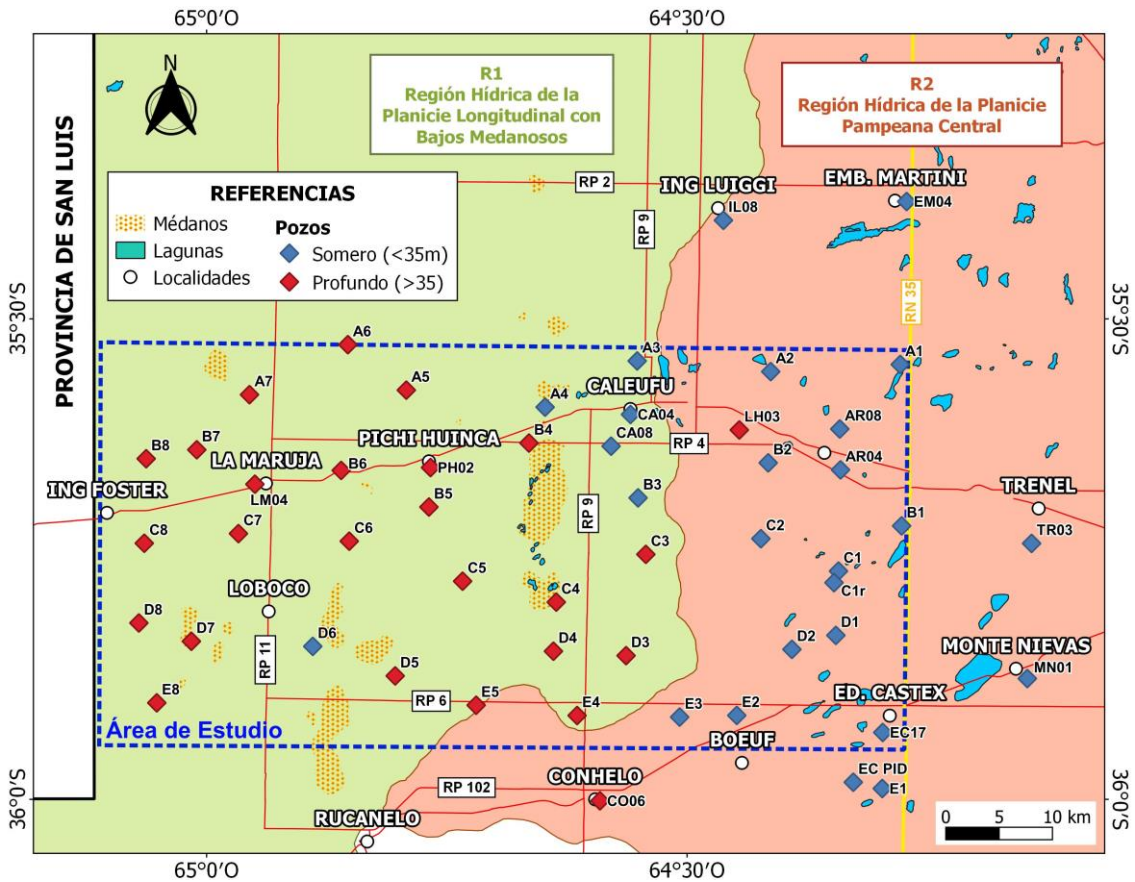


Figura 65. Distribución de los pozos someros y profundos según nivel estático, en el área de estudio y zonas aledañas.

A partir del diseño de la piezometría que se observa en la Figura 66, se observa una coincidencia con el mapa piezométrico regional presentado por los autores UNLPam (2015). Se registra una zona de alto potencial hidráulico con valores que superan los 200 m s.n.m. desde el norte de la localidad de Caleufú y Arata, hasta el norte de Eduardo Castex, definiendo una divisoria de aguas subterráneas. También se observa un bajo piezométrico con valores menores a 150 m s.n.m. en la zona de la localidad de Conhelo, movilizándolo el flujo hacia este sector, como se observa también en el mapa regional de la Figura 63. En la Figura 66 se calculó el gradiente hidráulico en 4 transectas distribuidas en

distintos sectores del mapa piezométrico. El gradiente hidráulico del flujo subterráneo N-S en la transecta D corresponde a un 0,22%, mientras que en la transecta B el flujo en sentido E-O presenta valores próximos a 0,33%.

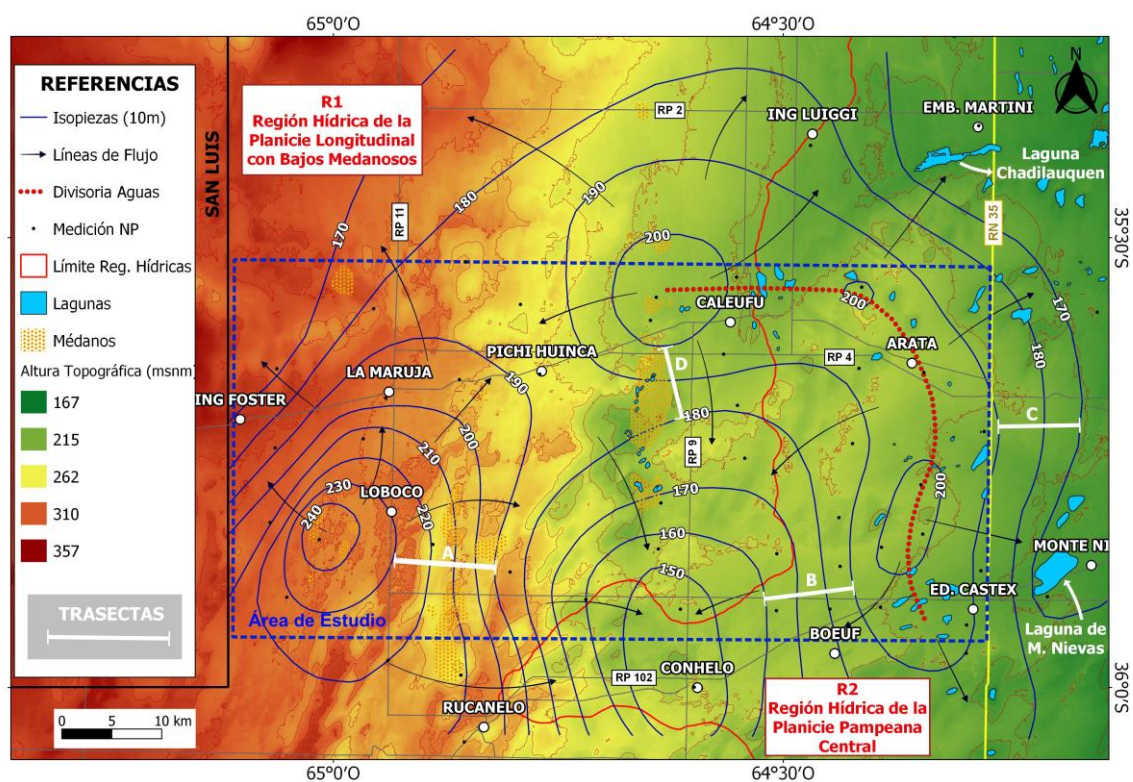


Figura 66. Mapa de equipotenciales y dirección de flujo de agua subterránea, y topografía del área de estudio. NP: Nivel Piezométrico.

En el extremo suroeste del área de estudio se observa una zona de recarga que alcanza el máximo piezométrico registrado, no obstante pasa inadvertido en el mapa regional. Esta zona ubicada sobre la región R1, se encuentra sobre geoformas medanosas, por lo que las mismas pueden favorecer la infiltración del agua hacia el acuífero. El flujo en el sur del área tiene un sentido O-E, hacia el bajo piezométrico de la localidad de Conhelo y presenta un gradiente hidráulico en el sector de la transecta A de 0,4%. En cambio, en el extremo noroeste, abarcando la misma región, se destacan potenciales hidráulicos bajos, a pesar de ser la zona topográfica de mayor altura sobre el nivel del mar, desviando el flujo en sentido S-N hasta esta dirección desde la zona de recarga. Hacia el este del área de interés, dentro de la región R2, el flujo retoma su sentido regional general hacia el este, con un gradiente hidráulico de 0,24% en el sector de la transecta C, encontrándose con importantes zonas de descargas permanentes cercanas, como lo son las lagunas de Chadilauquen de la localidad de Embajador Martini, y de Monte Nievas de la localidad homónima.

La gran mayoría de las lagunas del área de estudio y sus inmediaciones son de carácter temporario, a excepción de las mencionadas que actúan como zonas de descarga de sistemas hídricos y por lo tanto son permanentes. Aquellas

lagunas temporarias surgen como respuesta ante un ascenso del nivel freático que intersecta en zonas de depresión topográfica, generando una descarga allí, durante al menos una parte del año o una época húmeda, para luego disminuir espacialmente hasta desaparecer por evaporación.

Estas depresiones también pueden actuar como zonas de recarga bajo ciertas condiciones de nivel freático y lluvia, es decir, en una situación donde el nivel estático se encuentre por debajo de la superficie y en una época de precipitaciones de alta intensidad que puedan causar escorrentía y posterior estancamiento de aguas (Smedley *et al.*, 2000). En estas situaciones, el agua subterránea puede presentar una salinidad relativamente baja.

El área de estudio conforma en general una zona de conducción o transición del flujo subterráneo regional, con zonas de recarga y descarga local determinadas por zonas de médanos y depresiones respectivamente. Si bien el flujo regional es coincidente con la topografía, los flujos locales que se observan no lo son, y probablemente se encuentran bajo un control estructural dado por la gran variación de profundidad del basamento a lo largo y ancho de la zona de interés. El flujo subterráneo podría estar controlado en esta zona por un sistema de estructuras y fallas en el basamento y por esta razón se encuentran las aguas subterráneas tan profundas en algunas zonas, específicamente en la región R1 y en la zona de Conhelo.

En base a los gradientes hidráulicos medidos en las transectas, relativamente homogéneos del área de estudio, y considerando una conductividad hidráulica media de 12 m/d para la Formación Cerro Azul determinada por Castro (2013), la velocidad de Darcy varía entre 4,8 y 2,6 cm/d. Las velocidades de circulación son extremadamente reducidas y por lo tanto el tiempo de contacto agua-sedimento es prolongado, favoreciéndose la disolución de las sales presentes en los sedimentos y ocasionando el aumento de la concentración salina del agua (CFI, 1985).

8.3 Fluctuaciones del nivel freático

Con el objetivo de conocer las variaciones de los niveles freáticos en el área de estudio, la Administración Provincial del Agua realiza mediciones mensuales en freatímetros, distribuidos por distintas partes de la provincia (Tabla II del Anexo). Uno de ellos se encuentra en la localidad de Ingeniero Luiggi, muy próxima al área de estudio, dentro de la Región de la Planicie Pampeana Central (R2), y registra datos desde el año 1991 hasta la actualidad (Figura 67). También se cuenta con un freatímetro construido en la estación hidrometeorológica de la localidad de Arata (descrita en el capítulo 2 de Materiales Y Métodos), con el objetivo de conocer e interpretar el comportamiento del nivel freático en esta área. Por otro lado, cabe aclarar que

no se cuenta con freatímetros cercanos al área de estudio dentro de la Región de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1).

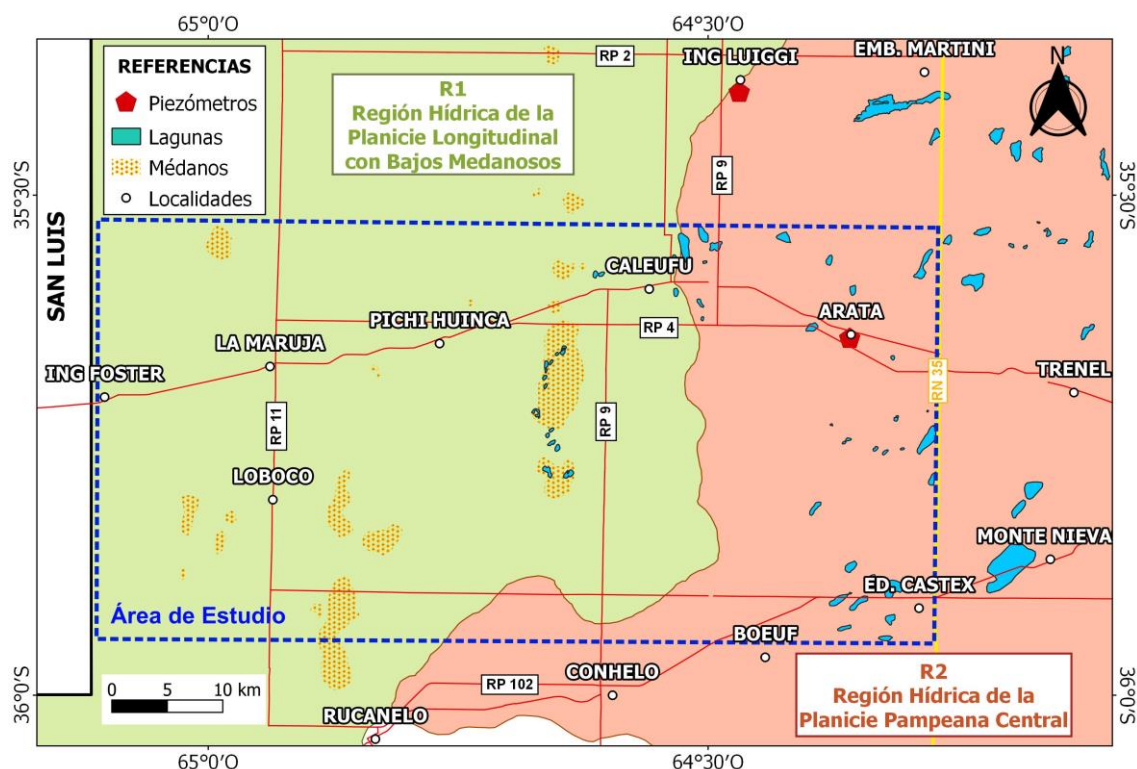


Figura 67. Ubicación de los piezómetros utilizados para el análisis de las fluctuaciones piezométricas.

El freatímetro ubicado en la localidad de Ingeniero Luigi se encuentra registrando los niveles de manera mensual por la Administración Provincial del Agua, y se cuenta con datos que abarcan el período 1991-2018 (Figura 68). El nivel freático en esta zona se encuentra somero, característica de la región R2, con una media de 3,7 m de profundidad, registrando un máximo de 6,48 m y un mínimo de 0,86 m.

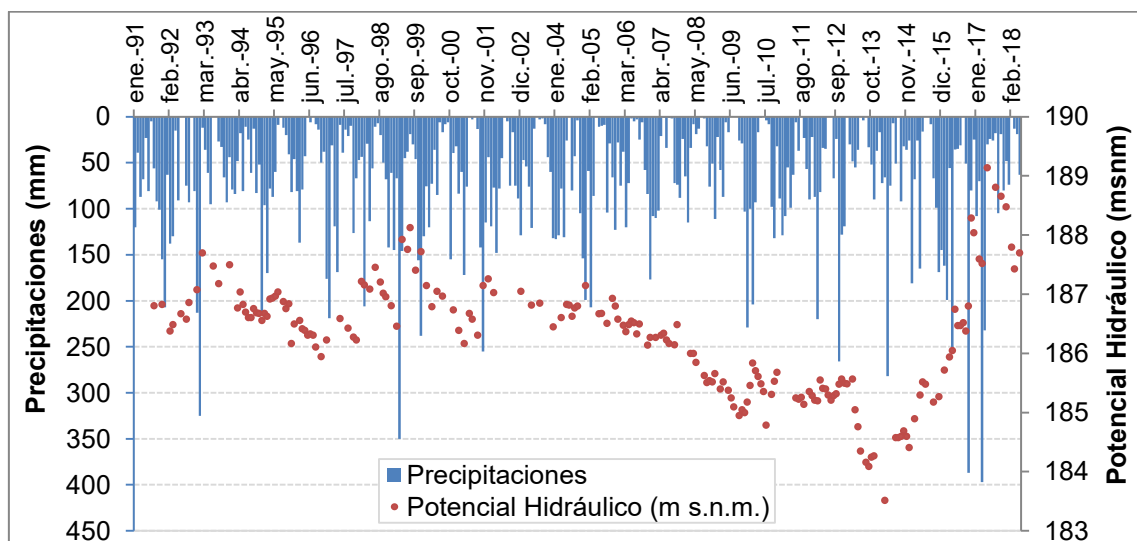


Figura 68. Variación piezométrica del freatímetro ubicado en la localidad de Ingeniero Luigi.

Al encontrarse el agua subterránea cercana a la superficie topográfica, sumado a la capa de arena que presenta esta zona de la Formación Junín, el nivel estático presenta una respuesta relativamente rápida con respecto al régimen de precipitaciones. Se observa que en épocas muy húmedas de lluvias abundantes como en los años 1992, 1999-2000, 2012 y 2016-2017, se registran valores máximos en el nivel freático, y de manera contraria, en épocas normales a secas el nivel estático desciende notablemente.

Por otra parte, el freatómetro de la localidad de Arata también sobre la región R2, es relativamente nuevo en comparación con el anterior, y presenta valores del nivel freático a partir de un limnógrafo de registro continuo desde junio de 2018 hasta octubre de 2021 (Tabla III del Anexo). Las variaciones del nivel freático no son tan notorias como en la zona de Ingeniero Luiggi, ya que el nivel se encuentra más profundo, presentando una media registrada de 16,3 m con un máximo de 16 m y un mínimo de 17 m. Si bien se logra observar una respuesta ante precipitaciones importantes, la respuesta del ascenso o descenso del nivel no es de manera inmediata como en el caso anterior (Figura 69).

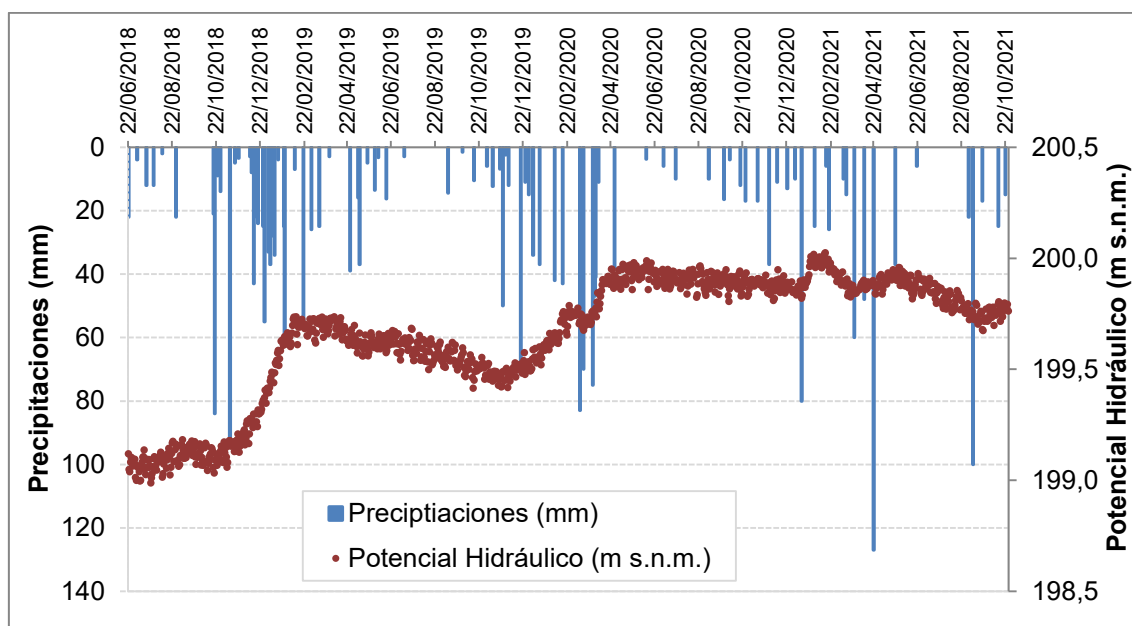


Figura 69. Variación piezométrica del freatómetro ubicado en la localidad de Arata.

9 RECARGA

9.1 Introducción

La recarga es el proceso por el cual el exceso de infiltración sobre la evapotranspiración drena desde la zona radicular y continúa en dirección descendente a través de la zona no saturada hacia la superficie freática, donde se refleja el aumento o descenso del almacenamiento de agua subterránea (Freeze y Cherry, 1979). La infiltración eficaz o recarga en los acuíferos se produce de manera muy diversa, difusa, preferencial y concentrada, con importantes circunstancias locales, requiriéndose tratamientos diferentes en cada caso.

En la caracterización de un balance de agua en el suelo (Figura 70) debe considerarse el factor climatológico y la respuesta del acuífero, el suelo y la vegetación. El agua infiltrada dependerá de la capacidad de infiltración del suelo, propiedad que es una función parabólica decreciente del contenido de humedad del suelo (ley de Horton) y que será máxima cuando el suelo tenga una humedad igual al punto de marchitez. La capacidad de infiltración será constante cuando la humedad sea superior a la capacidad de campo, produciéndose escorrentía superficial (Es) o anegamientos, cuando la precipitación supera la capacidad de infiltración.

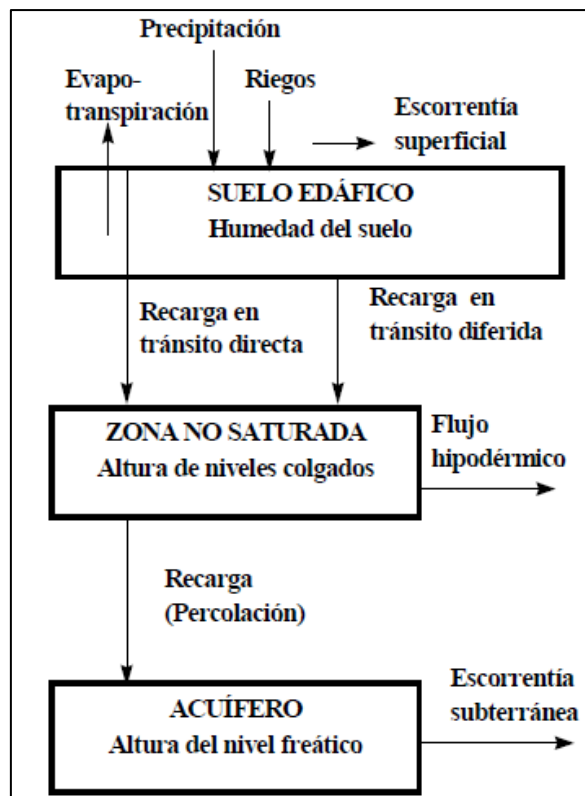


Figura 70. Esquema del balance hidrológico en el suelo (Samper *et al.*, 2005).

Uno de los aspectos fundamentales en los sistemas acuíferos cuando son sometidos a explotación, es observar su respuesta a esta acción en el tiempo. Para considerar que se trata de explotación racional y sustentable, se debe verificar que el caudal explotado (egresos del sistema) sea menor o igual al caudal de recarga (ingresos al sistema). La respuesta más común en los sistemas acuíferos que extraen más agua de la que ingresa, es una profundización de los niveles piezométricos (muchas veces acompañando por otros fenómenos como incremento en la concentración de sales). En general la recarga depende de la precipitación y su régimen de intensidad y frecuencia, los componentes climatológicos que definen la evapotranspiración, las características del suelo (porosidad, tasa de infiltración, grado de humedad, etc.), el tipo de sedimento, la topografía del terreno, entre otros. Los métodos de cálculo han de tener en cuenta estas circunstancias mediante la adecuada parametrización regional y el progresivo ajuste de estos parámetros mediante observaciones (Custodio Gimena, 1998).

Dado que no existen métodos de medición directa de la recarga, o bien solo son puntuales (Lerner *et al.*, 1990), surge la necesidad de determinar un valor a partir de varios métodos indirectos que estiman la recarga, debido a las limitaciones de cada uno. Por lo tanto, es necesaria la comparación entre los mismos para poder obtener un valor o un rango de variación de la recarga lo suficientemente confiable. Con tal motivo, se emplearon distintos métodos para la estimación de la recarga directa en el Acuífero Pampeano en la zona de la localidad de Ingeniero Luiggi (Figura 71), ubicada a aproximadamente 30 km del área de estudio, dado que cuenta con un registro de datos de niveles desde 1998 y además, el nivel estático se encuentra somero, lo cual es una condición para aplicar la mayoría de las metodologías. Por consiguiente se utilizó la Estación meteorológica Don Osvaldo, la cual es operada por la APA desde 1998, para las determinaciones climáticas y un muestreador de agua de lluvia para determinación de cloruros en la localidad de Arata para la aplicación del balance del ion cloruro.

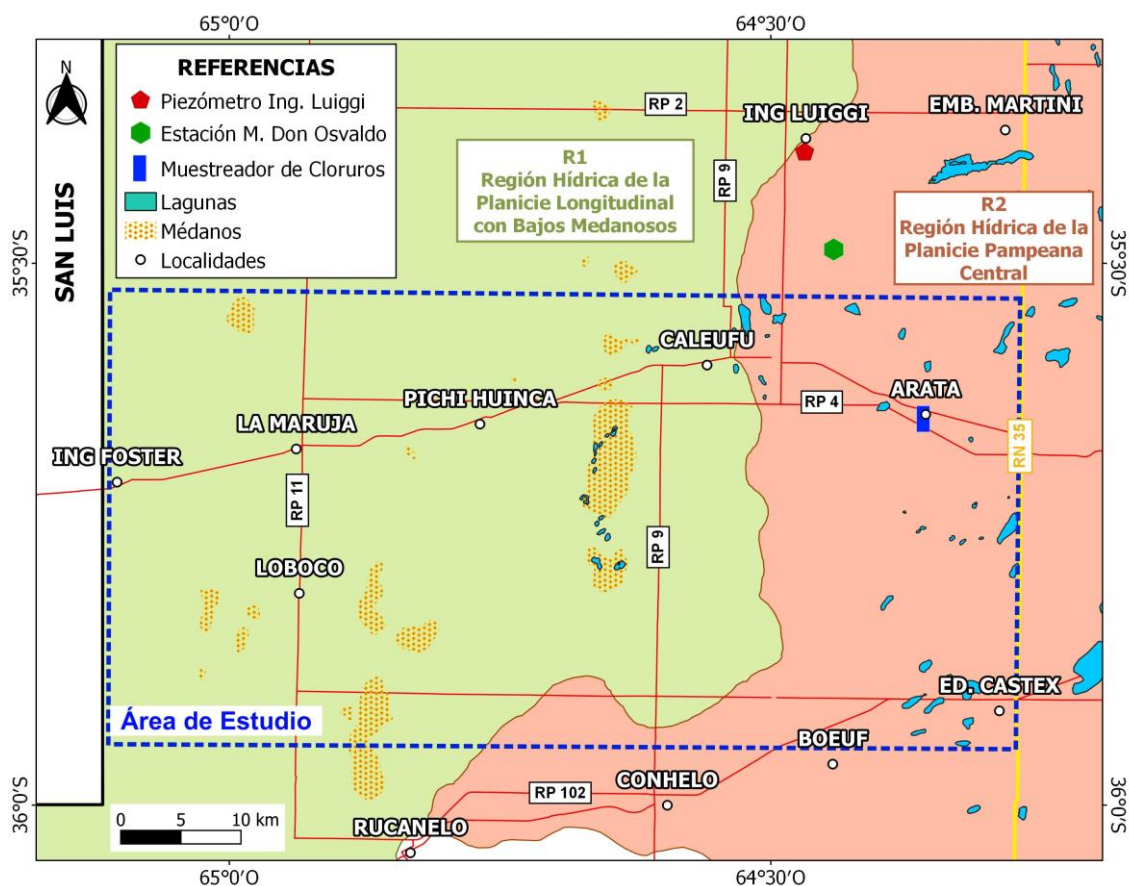


Figura 71. Ubicación del piezómetro, la estación meteorológica y el muestreador de agua de lluvia para determinación de cloruros, para la aplicación de métodos para la estimación de la recarga en la zona.

9.2 Balance hídrico en el suelo

El siguiente método para la estimación de la recarga, deriva de la ecuación de la continuidad o del balance global, que se basa fundamentalmente en el principio de conservación de masas o Ley de Lavoisier la cual enuncia que “la materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma”, expresada en la ecuación 1:

$$I - E = \pm \Delta S \quad [1]$$

donde I son los ingresos, E los egresos y ΔS la variación en el almacenamiento.

Dicha fórmula es aplicada a una región de volumen conocido, con condiciones de contorno definidas (Samper Calvete, 1998) y en un tiempo determinado. Detallando la ecuación 1, los ingresos y egresos se reemplazan por los distintos procesos que existan en el área de estudio, incluyendo generalmente como entradas a las precipitaciones y riegos, y como salidas a la evapotranspiración, el escurrimiento superficial y la recarga.

El método calcula esta última a partir de un enfoque residual o indirecto, como se observa en la ecuación 2:

$$R = P - ET - Ro - \Delta S \text{ [2]}$$

donde P es la precipitación, ET es la evapotranspiración, Ro es la escorrentía superficial y ΔS es el cambio de agua del suelo. Todas las variables de la ecuación pueden ser medidas o estimadas a excepción de la recarga (R), que es el resultado de la diferencia entre las demás.

Para este trabajo se empleó el modelo Visual Balan que permite realizar balances hidrológicos diarios en el medio subterráneo. El método permite la distinción de tres componentes con respecto al flujo de agua: el suelo edáfico, dominado por un flujo vertical, se incluyen la infiltración, las precipitaciones, la evapotranspiración, y el riego; la zona no saturada donde rigen tanto flujos laterales como verticales; y el acuífero donde se almacena y transmite el agua, y donde predominan flujos laterales (Samper *et al.*, 1999).

Se utilizaron datos correspondientes al período 1998-2016 de la estación meteorológica Don Osvaldo (35°29'14"S, 64°26'31"O) a unos 10 km al sur de la localidad de Ingeniero Luiggi, y datos freaticos del piezómetro de la Administración Provincial del Agua ubicado en la misma localidad, para el mismo período.

Los parámetros edáficos como la Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchitez Permanente (PMP) fueron calculados a partir de las fórmulas estipuladas por Fuentes y Cruz (1990) con datos extraídos del Inventario Integrado de Recursos Naturales de la Provincia (Cano *et al.*, 1980) obteniendo una CC de 16,1% y un PMP de 8,5%. La Porosidad Total estimada para la zona fue de 38%, valor intermedio entre lo tabulado para suelos arenosos (35%) y limosos (40%). El espesor del suelo es de 1 m, mientras que la Reserva de Agua Útil (RAU) presenta un valor de 75 mm.

En la Zona No Saturada se consideró un Coeficiente de Agotamiento del Flujo Hipodérmico de 0,77, calibrado con el mismo programa, y una conductividad hidráulica vertical de 0,42 m/d (CFI, 1985). Mientras que en el acuífero se utilizó un coeficiente de agotamiento de 0,000715 y un coeficiente de almacenamiento de 0,1, ambos valores calibrados en el programa.

La evapotranspiración del período se calculó con el software ETo Calculator v3.2, desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO (2012) para calcular la tasa de evapotranspiración de referencia (ET_o), considerando como superficie de referencia un suelo cubierto en su totalidad por un cultivo hipotético de pasto de condiciones uniforme, corto y bien regado. La ET_o es calculada mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), la cual

requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento.

La evapotranspiración real fue calculada por el *software* a partir del método lineal, con un valor umbral de déficit (CBML) de 75 mm, y la recarga en tránsito por el método convencional sin flujo preferente. La precipitación media anual del período fue de 787 mm.

9.2.1 Aplicación del Balance Hídrico del Suelo

A partir de la ejecución del programa Visual Balan, se obtuvo un valor medio anual de recarga de 55,8 mm anuales, equivalente al 6,4% de las precipitaciones como se observa en la Figura 72. En la Figura 73 se puede apreciar el ajuste logrado por el programa entre los niveles calculados por el mismo y los niveles medidos en el piezómetro. Presentó un error cuadrático medio satisfactorio de 0,5062 m y un error cuadrático óptimo de 0,4749 m. Nuevamente en la Figura 74 se puede observar la bondad del ajuste entre los niveles freáticos mencionados.

De igual manera en la Figura 74, se observa al comienzo del período analizado, principalmente en los años 1999 y 2000, que los niveles freáticos se encuentran más someros, siendo 1,8 m de profundidad desde la superficie el valor más bajo registrado. Este ascenso se encuentra asociado a un período consecutivo de lluvias abundantes que superaron notablemente la media anual de la zona (año hidrológico 1998-1999: 1.112 mm; y 1999-2000: 1.046,5 mm). En general, luego de mencionado período, los niveles comienzan a descender mostrando algunos picos intercalados que coinciden con las precipitaciones pronunciadas de primavera y verano. El nivel más profundo registrado fue de 6,48 metros en el año 2014, como consecuencia de una continuidad de años con precipitaciones por debajo de la media anual. A mediados del año 2015, los niveles comienzan a tener una tendencia ascendente que continuó hasta el final del período analizado.

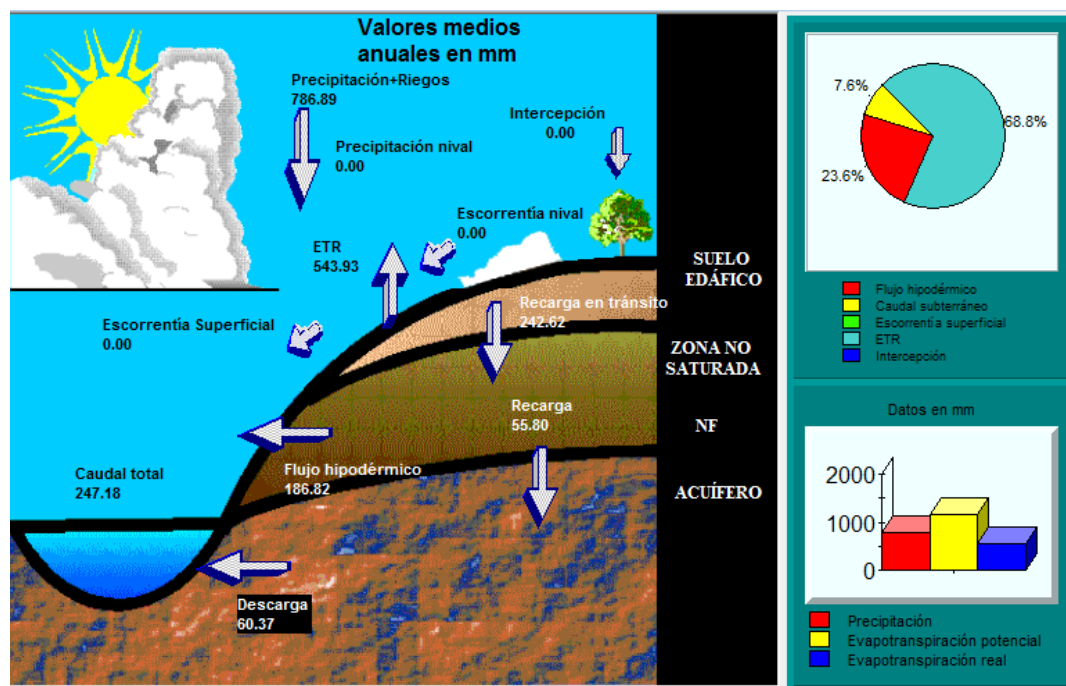


Figura 72. Balance hídrico efectuado a través del software Visual Balan para la localidad de Ingeniero Luiggi.

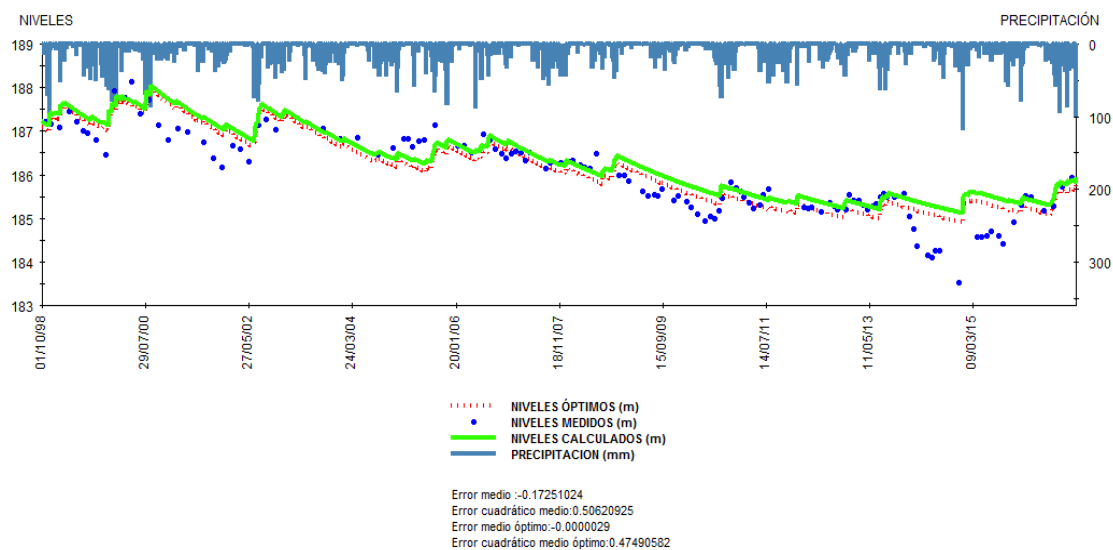


Figura 73. Representación de niveles freáticos óptimos, medidos y calculados en m s.n.m. para el piezómetro de Ingeniero Luiggi.

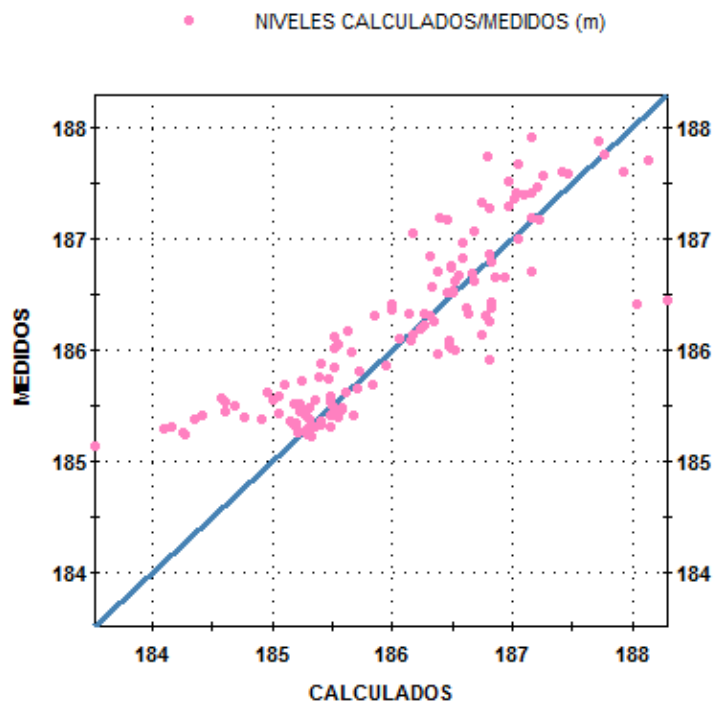


Figura 74. Ajuste de los niveles medidos y calculados.

9.3 Método de las Fluctuaciones del nivel freático

Es uno de los métodos más utilizado para estimar la recarga y está basado en la premisa que la elevación del nivel en acuíferos libres se debe al agua de recarga (Varni, 2005). La recarga puede estimarse en un acuífero con un área determinada, considerando las fluctuaciones del nivel freático y los caudales subterráneos que ingresan y egresan, siempre que los puntos a considerar no estén influenciados por la explotación. Se expresa a partir de la siguiente ecuación 3:

$$R = (\Delta h \cdot S) - [(Q_i - Q_o)/A \cdot \Delta t] \quad [3]$$

siendo R la recarga, Δh la fluctuación del nivel freático, S el coeficiente de almacenamiento, Q_i y Q_o el caudal entrante y caudal saliente respectivamente; A el área del acuífero y Δt el período de tiempo considerado.

Según Olin (1995), analizando un período sin recarga en un acuífero que no se encuentre afectado por bombeo, ni por evapotranspiración directa, la variación que presenta el nivel freático representará la diferencia entre el caudal subterráneo entrante y el saliente del área considerada. Si el nivel estático desciende en dicho período, la lámina que declina es equivalente a la lámina que sale como escurrimiento subterráneo. Considerando varios períodos con dichas características se puede obtener un valor diario de descenso denominado “tasa de recesión” (TR), representada en la ecuación 4:

$$TR = (\Delta h.S/\Delta t) [4]$$

Reemplazando el segundo término de la ecuación 3 por dicha tasa de recesión (Mariño y Bonorino, 1996), se obtiene la ecuación 5:

$$R = (\Delta h.S) - (TR. \Delta t) [5]$$

siendo R la recarga, Δh la fluctuación del nivel freático (nivel final menos nivel inicial, empleándose alturas piezométricas), S el coeficiente de almacenamiento, TR la tasa de recesión y Δt el período de tiempo considerado.

Para la aplicación del método descripto, se utilizaron los datos del piezómetro ubicado en la localidad de Ingeniero Luiggi, brindados por la Administración Provincial del Agua, cuyas mediciones son realizadas periódicamente (Tabla II del Anexo). Se analizaron los datos de mayor continuidad de mediciones que abarcan el período 1998-2016. Los datos freaticimétricos se analizaron en 20 subperíodos de duración aproximadamente anual, preferentemente entre junio de un año y mayo del año siguiente (con excepciones por falta de medición del nivel en el mes de junio), considerando el año hidrológico de las precipitaciones. Por lo tanto, el período abarcado fue de junio de 1997 a mayo de 2017.

9.3.1 Análisis de las fluctuaciones del nivel freático

La tasa de recesión fue calculada a partir del promedio de tres intervalos con precipitaciones nulas o casi nulas (menores a 6 mm) detallados en la Tabla 15. Los intervalos encontrados en los datos disponibles variaron entre 28 a 30 días y se obtuvo una tasa de recesión promedia de -0,11 mm diarios. Se utilizó un coeficiente de almacenamiento del 0,1 obtenida a partir de la calibración realizada en el método anterior con el software Visual Balan.

Tabla 15. Tasa de recesión calculada para tres períodos con precipitaciones nulas o menores a 6 mm.

Período	Δh (mm)	Δt (días)	TR (mm/d)
13/06/1996 al 12/07/1996	-20,00	29	-0,07
19/05/2004 al 18/06/2004	-10,00	30	-0,03
27/06/2007 al 25/07/2007	-60,00	28	-0,21
Tasa de Recesión Promedia			-0,11

Con este método, la tasa de recarga media anual del período 21/06/1997-30/05/2017 resultó de 53 mm anuales, correspondiendo al 5,24% de las precipitaciones. El último subperíodo registró la mayor recarga, con un aumento del nivel entre la fecha inicial y final de 2,67 metros como consecuencia de la ocurrencia de abundantes precipitaciones. Otros subperíodos de registros altos de recarga fueron 1997-1998, 2014-2015 y

2015-2016 con valores de 130,8, 128,3 y 139,2 mm respectivamente. En dichos períodos las precipitaciones superaron notablemente la media para la zona. A partir del año 1999, con el cese de las extremas precipitaciones, los niveles tuvieron tendencia descendente registrando en el período 2012-2013 el mayor descenso desde la fecha inicial a la final, de unos 0,95 m.

9.4 Balance del ion Cloruro

Esta metodología consiste en determinar la relación entre la concentración de cloruro en el agua de lluvia y en el agua subterránea. En este sentido, en el caso en que la escorrentía directa no produzca lavado de sales, el balance del ion cloruro puede expresarse como en la ecuación 1 (Custodio y Llamas, 1983; FCIHS, 2009):

$$R \cdot Cl_{as} = (P - ED) \cdot Cl_p + as + av + av' \quad [1]$$

donde R: recarga; Cl_{as} : concentración media en cloruros en el agua subterránea; P: precipitación media anual del período; ED: escorrentía directa; Cl_p : concentración media de cloruros en la lluvia; as: cantidad de cloruros aportados por el terreno o añadidos artificialmente; av: cantidad de cloruros retenida por la vegetación; av': cantidad de cloruros devueltos al terreno por la descomposición de la vegetación.

Si se suponen condiciones estacionarias, se desprecia el escurrimiento superficial y se asume la ausencia de fuentes y sumideros de cloruro en la zona no saturada, y esto se reduce a la ecuación 2:

$$R = Cl_p / Cl_{as} \cdot P \quad [2]$$

La misma es válida bajo condiciones de flujo pistón entre la superficie del terreno y el nivel freático, así como bajo ausencia de vías de flujo preferencial en la zona no saturada y flujo horizontal en la zona superior del acuífero despreciable frente a la recarga (Usunoff *et al.*, 1999).

9.4.1 Aplicación del Balance del ion cloruro

Para ello se muestrearon precipitaciones en colectores diseñados para tal fin en la localidad de Arata. Se cuenta con datos de 123 muestras de precipitaciones diarias colectadas entre marzo de 2018 y octubre de 2022 por la Cooperativa de Arata (COSEPAR), analizadas posteriormente en el Laboratorio de Aguas de la FCEyN de la UNLPam. En la Tabla IV del Anexo se detallan los datos de cloruro obtenidos. Este método se aplicó para estimar la recarga en la localidad de Arata, disponiendo de colectores de precipitaciones a fin de determinar la concentración de cloruro, y análisis del ion cloruro del

agua del acuífero somero analizadas recurrentemente por la Administración Provincial del Agua (APA) a través de perforaciones de explotación.

La concentración media de cloruro obtenida en la localidad de Arata fue de 1,61 mg/L. En cuanto a la concentración de cloruro en el agua subterránea, se tomó como referencia valores promedios de cloruro obtenidos de pozos someros utilizados para abastecimiento de la localidad. A fin de homogenizar la información, los promedios utilizados se obtuvieron de datos antecedentes obtenidos entre 2018-2022, en tanto que la precipitación media anual se corresponde al mismo período.

A modo de síntesis, en la Tabla 16 se exponen los resultados de las variables involucradas para la estimación de la recarga y los valores encontrados para cada uno de los sectores, expresados en mm/año y en porcentaje de las precipitaciones.

Tabla 16. Resumen de los parámetros utilizados para el cálculo de la recarga con el Balance del ion Cl en la localidad de Arata.

	Cl_{as} (mg/l)	Cl_p (mg/l)	Precipitación Media Anual (mm)	Recarga (mm/año)	Recarga (%)
Arata	101,2	1,61	699,8	11,1	2%

9.5 Valores de Recarga

El Acuífero Pampeano en el área de Ingeniero Luiggi posee una recarga anual promedio de 55,8 mm aplicando el modelo Visual Balan y de 53 mm en base al análisis de la fluctuación del nivel freático, correspondiendo al 6,4% y 5,24% de las precipitaciones del período analizado, respectivamente. El rango de valores resultantes de ambos métodos constituye una estimación razonable, considerando que se contó con un período de datos importantes y representativos para épocas húmedas como fueron los períodos 1998-1999 y 2016-2017 y de épocas secas como se registró en los años 2008-2009 y 2012-2013.

En el método de las fluctuaciones del nivel freático, aquellas precipitaciones anuales que variaron entre los 600 y 900 mm determinaron valores de recarga entre los 25 y 50 mm, mientras que para valores de precipitaciones que superaron los 900 mm, la recarga varió entre 70 y 140 mm. Se presentaron eventos extremos como el registrado en el período 2016-2017, donde las lluvias fueron de 1.440 mm, el valor de recarga se aproximó a los 300 mm y los niveles freáticos se acercaron a 1,80 m de la superficie. Se registraron recargas nulas cuando las precipitaciones eran menores a los 500 mm/año, con descensos que variaron entre los 38 y 95 cm.

El acuífero presentó una rápida respuesta en cuanto a los eventos pluviométricos registrados en el tiempo. El clima es uno de los principales factores en el proceso de recarga del acuífero, siendo las precipitaciones y la evapotranspiración indispensables y determinantes para conocer la disponibilidad del agua en el suelo. Otro factor importante es la textura de los sedimentos en la zona no saturada dado que, si bien la variación de los niveles freáticos se genera en la Formación Cerro Azul, cabe destacar la importancia del manto de textura arenosa fina suprayacente, que siendo de poco espesor y su mayor permeabilidad, influye en la rápida respuesta del acuífero ante los mencionados eventos de lluvia.

El empleo de modelos matemáticos para estimar la recarga trae asociados inconvenientes respecto a algunos de los datos que requiere y son de difícil obtención, principalmente parámetros del acuífero y de la zona no saturada. Uno de los datos importantes para el modelo es el coeficiente de almacenamiento del acuífero, del cual no existen antecedentes precisos en la zona, por lo que dicho valor fue calibrado con el software Visual Balan.

Por otro lado, cabe destacar una gran diferencia de valores de recarga cuando se aplica el método del balance del ion cloruro en la localidad de Arata. El valor obtenido es de 11 mm anuales durante el período analizado de 2018-2022, que corresponde al 2% de las precipitaciones de la localidad para ese mismo período. Esta gran diferencia con los valores obtenidos en Ingeniero Luiggi pueden deberse a la reducidas precipitaciones y años de sequía que abarca el período analizado. Esto conlleva a la necesidad de actualizar dicho valor a medida que se cuente con más datos de cloruros en la zona.

Conocer la recarga de la zona permite analizar la evolución temporal del acuífero y su comportamiento respecto a las variables más importantes como son la precipitación y la evapotranspiración en el balance. Cabe destacar la importancia de la continuidad de las mediciones realizadas por parte de la APA y de la Cooperativa de la localidad de Arata (COSEPAR) para efectuar estudios a futuro que permitan actualizar los valores de recarga.

10 HIDROQUÍMICA

10.1 Composición fisicoquímica de las precipitaciones

El agua de lluvia es el origen de la recarga del agua subterránea en el acuífero libre formado por los sedimentos loésicos de la Formación Cerro Azul, a partir de la infiltración de sus excedentes, determinado en distintos estudios de recarga en la llanura pampeana (Carretero y Kruse, 2010; Quiroz *et al.*, 2008; Carrica y Lexow, 2004), por lo que resulta un componente esencial en la dinámica subterránea.

En las zonas de llanura, la composición química de las aguas subterráneas es el resultado de, en primera instancia, la evapoconcentración de las precipitaciones dado al polvo y sales atmosféricas y, en segundo lugar, de la interacción entre el agua de precipitación y los minerales que conforman los sedimentos (López-Geta *et al.*, 2009). Dado que es la única entrada de agua al sistema subterráneo, es imprescindible conocer su evolución hidroquímica.

En la Tabla 17 se muestran los valores medios, mínimos, máximos y el desvío estándar de variables fisicoquímicas determinadas en 123 muestras de agua de lluvia, colectadas en la localidad de Arata: pH, conductividad eléctrica y concentración de cloruros (Tabla IV del Anexo). Puede observarse una gran variabilidad respecto a la conductividad eléctrica y cloruros, presentando valores mínimos de 7 $\mu\text{S/cm}$ y 0,01 mg/L, y máximos de 292 $\mu\text{S/cm}$ y 6,3 mg/L. Por su parte, el pH no registra gran variabilidad, oscilando entre valores neutros 6 y 7,8. En la Figura 75 se observa la variabilidad de las determinaciones de conductividad eléctrica en precipitaciones a lo largo del tiempo, destacándose un aumento en períodos secos y una disminución en períodos húmedos. Mientras que en la Figura 76, donde se encuentra representada la variabilidad de las precipitaciones y los valores de pH obtenidos en el tiempo, no se observa un patrón determinado y se mantienen cercano a un valor de pH neutral.

Tabla 17. Resumen estadístico de algunos parámetros fisicoquímicos de las precipitaciones de la localidad de Arata.

n = 123	Media	Mínima	Máxima	Desvío Estándar
pH	6,78	6,07	7,80	0,33
Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	72,97	7,0	292,0	64,57
Cl ⁻	1,61	0,01	6,30	1,42

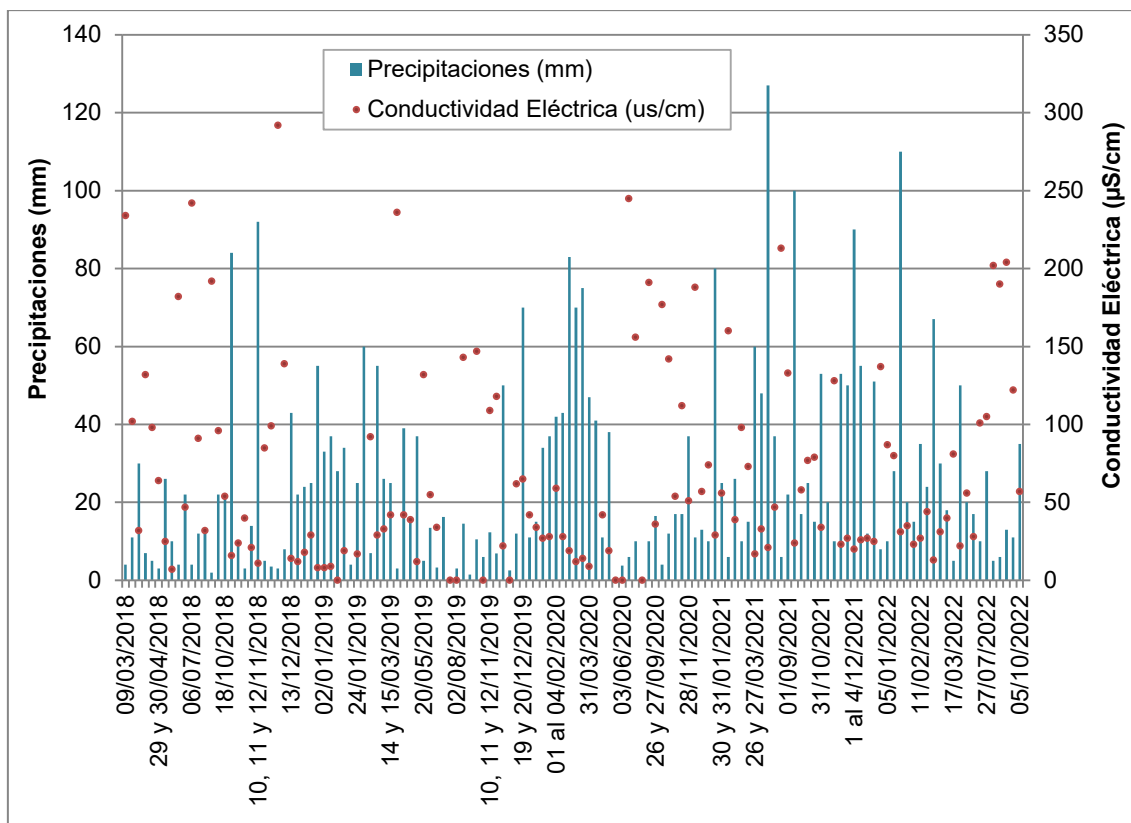


Figura 75. Variación temporal de la precipitación diaria vs. conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

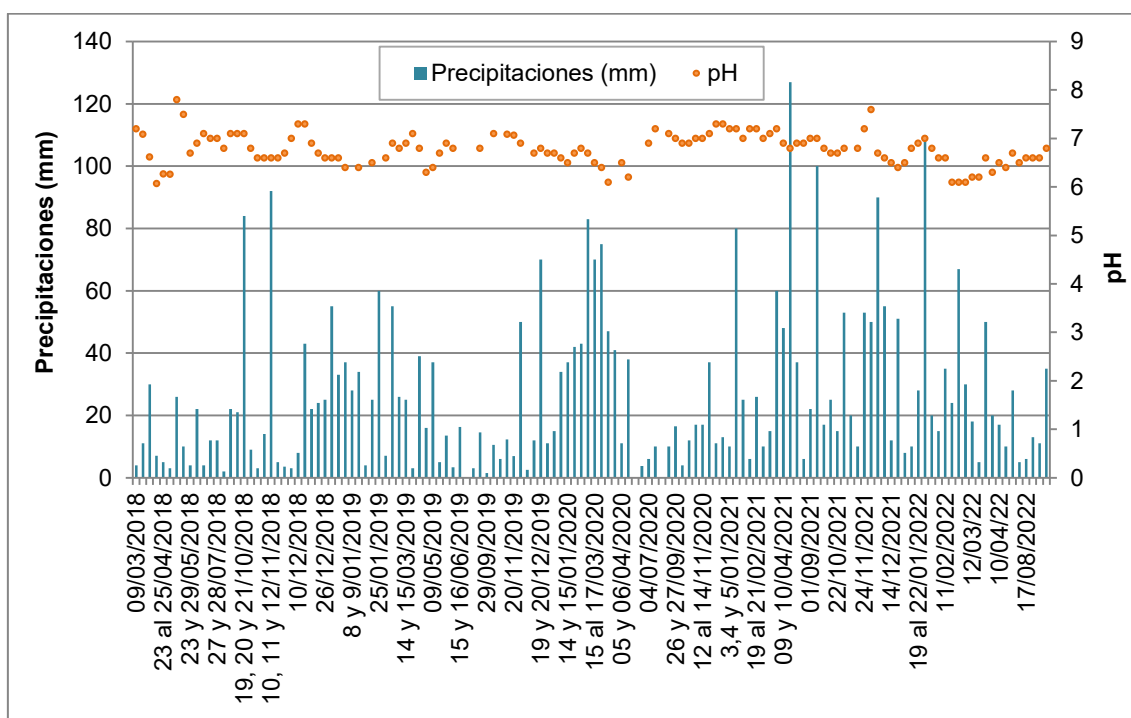


Figura 76. Variación temporal de la precipitación diaria vs. pH.

Ceballo (2020) presentó una clasificación hidroquímica del agua de lluvia colectada en la localidad de Quemú Quemú e Intendente Alvear, determinando que en dichas muestras colectadas entre 2012 y 2015 dominan el cloruro y el

sulfato, mientras que respecto a los cationes prevalecen el ion calcio y el magnesio (Figura 77). Este resultado es consistente con lo que determina Custodio y Llamas (1983), quien menciona que en las aguas de lluvia dominan los iones Cl^- , Na^+ y K^+ , y a medida que se adentran en el continente domina también el SO_4^{2-} y a veces el ion HCO_3^- .

Lluvias Intendente Alvear
Septiembre 2012-Enero 2015

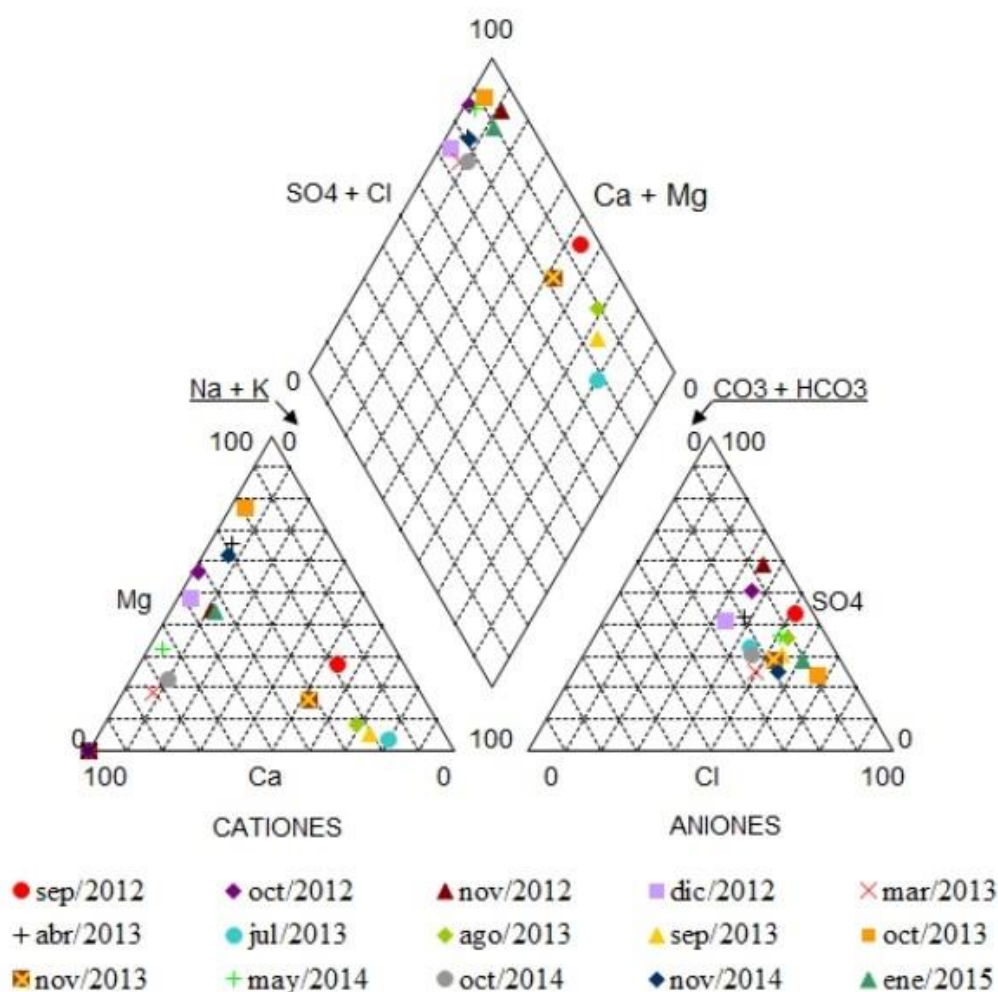


Figura 77. Diagrama de Piper correspondiente a las precipitaciones de Intendente Alvear, extraído de Ceballo (2020).

10.2 Composición fisicoquímica del agua subterránea

Para la caracterización hidroquímica del acuífero en estudio se extrajeron 39 muestras distribuidas en toda el área de estudio en el mes de noviembre de 2018, abarcando ambas regiones hídricas de interés, Región de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1) y Región de la Planicie Pampeana Central (R2). A su vez, se utilizaron 13 muestras fisicoquímicas extraídas en

fechas cercanas por la APA en pozos de abastecimiento ubicados en las localidades dentro y aledañas al área de estudio (Tabla V del Anexo). En el mapa de la Figura 78 se observa la ubicación de cada muestra con análisis fisicoquímico completo utilizado para el análisis hidroquímico. En la Tabla 18 se presenta un resumen estadístico de los principales componentes fisicoquímicos.

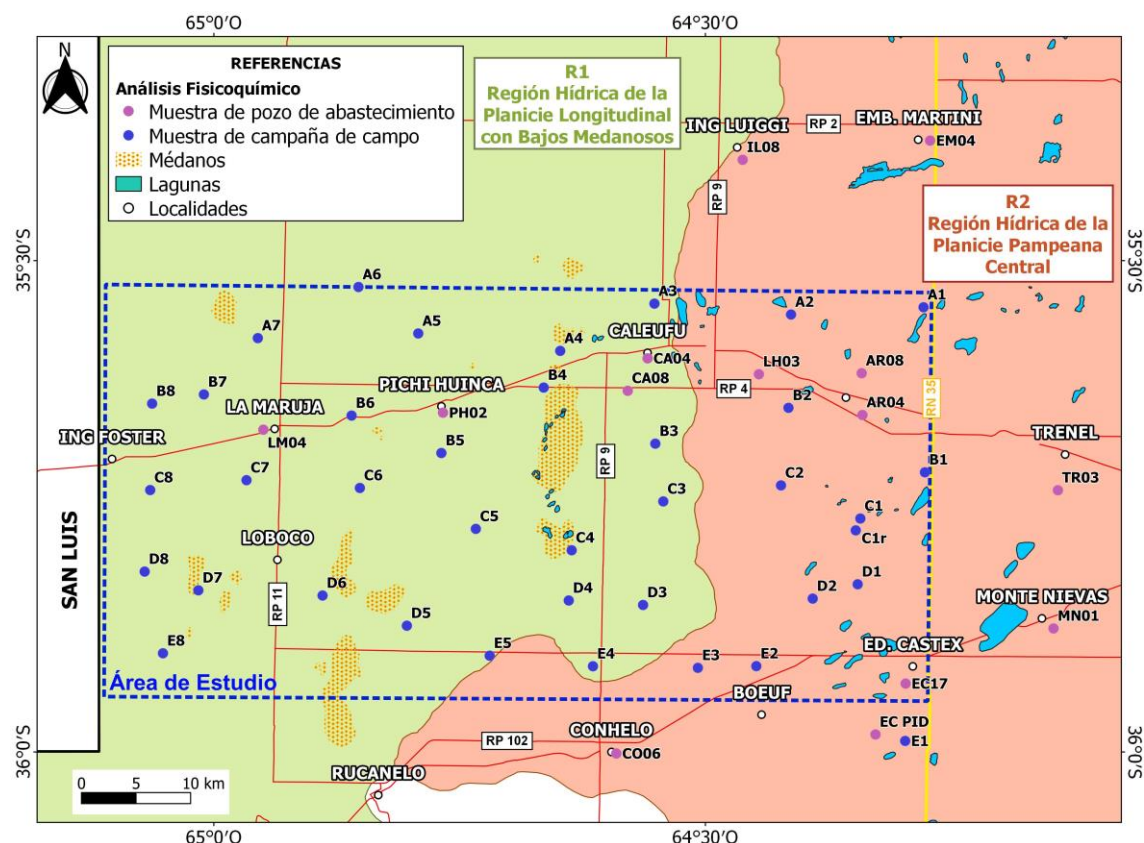


Figura 78. Ubicación de las muestras con análisis fisicoquímicos completos extraídas durante campañas de campo y de pozos de abastecimiento de la APA.

Tabla 18. Resumen estadístico de los componentes fisicoquímicos de las muestras extraídas en el acuífero de interés.

TOTAL	n	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar
pH	52	7,8	7,8	6,8	8,9	0,4
C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	52	3.373	2.779	842	10.760	2.073
R.S. (mg/L)	52	2.385	2.151	646	6.470	1.281
STD (mg/L)	52	2.690	2.516	855	6.845	1.282
CO_3^{2-} (mg/L)	52	4	0	0	60	12
HCO_3^- (mg/L)	52	606	541	279	1239	243
Cl^- (mg/L)	52	469	301	14	2.545	538
SO_4^{2-} (mg/L)	52	521	467	18	1.432	343
Ca^{2+} (mg/L)	52	37	26	1	135	33
Mg^{2+} (mg/L)	52	67	45	1	300	68
Na^+ (mg/L)	52	645	570	117	1.880	371
K^+ (mg/L)	49	14	12	4	38	8

TOTAL	n	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar
NO ₃ ⁻ (mg/L)	52	31	21	3	102	27
F ⁻ (mg/L)	51	5	4	1	17	3

Los resultados estadísticos de los parámetros fisicoquímicos mayoritarios presentan valores muy variables. Se presentan muestras con contenido iónico alto que alcanzan valores de conductividad eléctrica (CE) de 10.760 μ S/cm y residuo seco (RS) de 6.470 mg/L, en contraste con valores de muy bajos que alcanzan los 842 μ S/cm y 646 mg/L respectivamente. Estas muestras de alta salinidad presentan contenidos extremos de Cl⁻, SO₄²⁻ y Na⁺ principalmente, que dominan dentro del contenido iónico. Por su parte, el NO₃⁻ presentó una media que no supera los 50 mg/L, variando entre 102,3 y 2,8 mg/L. En cuanto el F⁻ el área presentó una abundancia generalizada de este ion en las aguas subterráneas, variando entre un mínimo y un máximo de 1 y 17 mg/L respectivamente, con una media de 5 mg/L.

En la Tabla 19, se observan los estadísticos principales para los distintos parámetros fisicoquímicos e iones mayoritarios correspondientes a la región R1 predominada por pozos profundos, y la región R2 caracterizada por pozos someros. Se destaca que no se encuentran diferencias significativas entre las medias de los distintos parámetros e iones en ambas regiones, incluso considerando que existe una diferencia en la profundidad de nivel freático importante entre ambas. Esto puede deberse en parte a que en la región R1 existe un número de muestras extraídas en áreas de médanos que actúan como zonas de recarga local del acuífero por lo que la salinidad de las muestras es menor que el resto de la misma región. Mientras que en la región R2 se encuentran muestras extraídas próximas a zonas de lagunas que actúan como zona de descarga, lo que hace que su salinidad sea mayor en comparación a las demás muestras de la misma región.

Tabla 19. Resumen y comparación estadística de los principales parámetros fisicoquímicos de las muestras correspondientes a las R1 y R2.

R1	pH	C.E. (mS)	R.S. (mg/L)	STD (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
n	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	29	30
Media	7,8	3.393	2.401	2.676	6	544	508	470	39	74	622	15	33
Mediana	7,6	3.007	2.271	2.585	0	462	375	414	27	50	570	14	24
Mínimo	6,8	842	646	855	0	279	14	18	1	1	117	5	4
Máximo	8,9	10.760	6.166	6.393	60	1.134	2.545	1.115	135	300	1.880	38	102
Desv. Est.	0,5	2.234	1.229	1.229	15	225	590	293	34	71	393	8	29
R2	pH	C.E. (mS)	R.S. (mg/L)	STD (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
n	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	20	22
Media	7,8	3.345	2.362	2.708	2	690	417	590	36	59	677	13	28
Mediana	7,9	2.696	1.952	2.290	0	650	216	490	20	37	571	11	17
Mínimo	7,1	1.440	924	1.150	0	364	34	107	4	8	276	4	3

R1	pH	C.E. (mS)	R.S. (mg/L)	STD (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Máximo	8,4	9.070	6.470	6.845	20	1.239	1.639	1.432	133	260	1.574	31	82
Desv. Est.	0,4	1.882	1.379	1.379	5	246	465	397	33	65	345	8	26

10.2.1 Distribución espacial de la conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos

Conocer la distribución espacial de la conductividad eléctrica (CE) permite formular primeras suposiciones sobre el tipo de agua que se están estudiando, dado que este parámetro es un buen indicador de la salinidad ya que aumenta a medida que crece el contenido iónico en el agua (Custodio y Llamas, 1983; Hounslow, 1995). Otro primer indicador de laboratorio más directo para determinar el tipo de aguas son los sólidos disueltos totales (SDT), que representan la totalidad de iones disueltos en el agua.

En el área de estudio se identifican valores de CE que varían entre 840 y 10.800 $\mu\text{S/cm}$ y valores de SDT que varían entre 845 y 6.845 mg/L. Observando la Figura 79, se destaca que los diagramas de caja de ambas regiones de interés presentan diferencias en la dispersión, siendo mayor en la región R1. Esta última región presenta una mediana de 3.007 $\mu\text{S/cm}$ en la CE y de 2.585 mg/L respecto a los SDT, con una distribución de datos más simétrica. Mientras que la mediana de la región R2 es levemente menor, con un valor de 2.696 $\mu\text{S/cm}$ de CE y 2.290 mg/L de SDT, presentando una distribución con una asimetría positiva en ambos diagramas (con un mayor sesgo de los datos hacia valores mayores), por lo que los primeros 50% de los datos se hallan concentrados entre 1.440 y 2.696 $\mu\text{S/cm}$ en la CE y entre 1.150 y 2.290 mg/L en los SDT. Respecto a la CE, se registraron valores *outliers* o atípicos en el diagrama de caja (en estadística, valores numéricamente distante del resto de los datos) en ambas regiones, con una máxima registrada en la región R1 donde dominan los pozos profundos, alcanzando un valor de 10.760 $\mu\text{S/cm}$, lo que genera una mayor dispersión en esta región. Los valores *outliers* o atípicos en la región R2, dominada por pozos con niveles freáticos someros, alcanzaron valores de 6.380 y 9.070 $\mu\text{S/cm}$ (LH03 y E1). En los resultados de los SDT también se observan datos atípicos en ambas regiones, pero registrándose el valor máximo en la región R2 con un valor de 6.845 mg/L (E1).

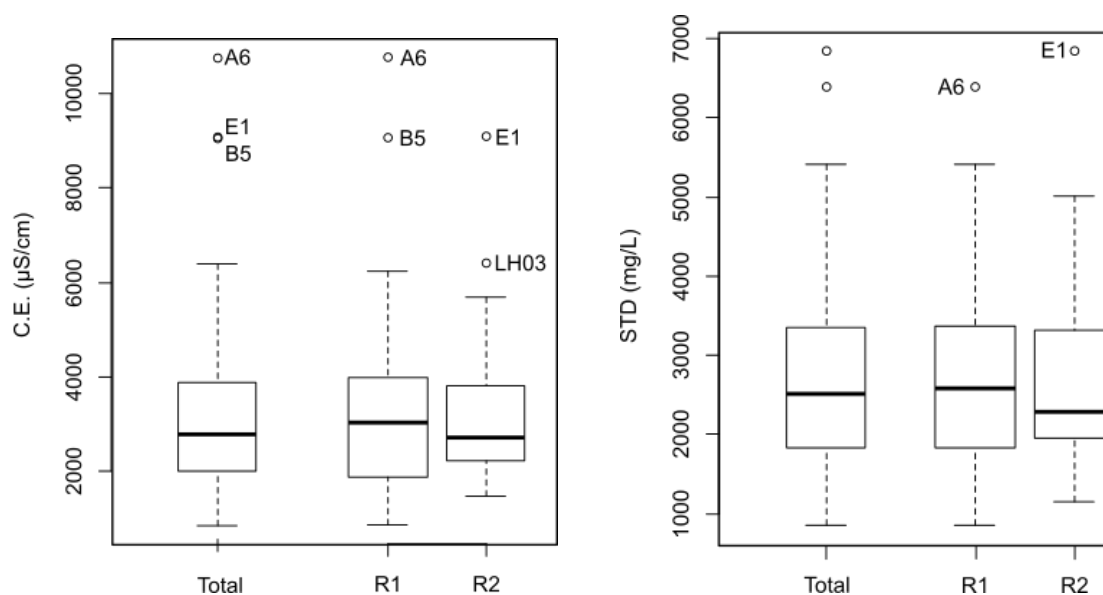


Figura 79. Diagramas de caja de la CE y los SDT, por la totalidad de muestras y por región.

A fin de conocer la distribución espacial de la CE y de los SDT se realizaron dos mapas teniendo como referencia la piezometría del área de estudio (Figura 80 y Figura 81). Respecto a la CE, la región R1 presenta un 43% de las muestras con valores menores a 2.800 $\mu\text{S/cm}$ y un 37% de los datos con valores entre 2.800 y 4.000 $\mu\text{S/cm}$, mientras que la región R2 casi un 60% de los datos se encuentran por debajo de 2.800 $\mu\text{S/cm}$ y un 17% entre 2.800 y 4.000 $\mu\text{S/cm}$ indicando que presenta una leve predominancia de valores menores de CE en el área. Por su parte, los valores más bajos (<2.000 mg/L), clasificadas como aguas dulces según García Maurizzio (2012), están mayormente distribuidos en la región R2 con un 40% de los datos y un 30% en la región R1, mientras que un 60% de los datos de la región R1 se encuentran dentro del rango de 2.000 y 4.000 mg/L (agua salobre) y un 45% en la región R2.

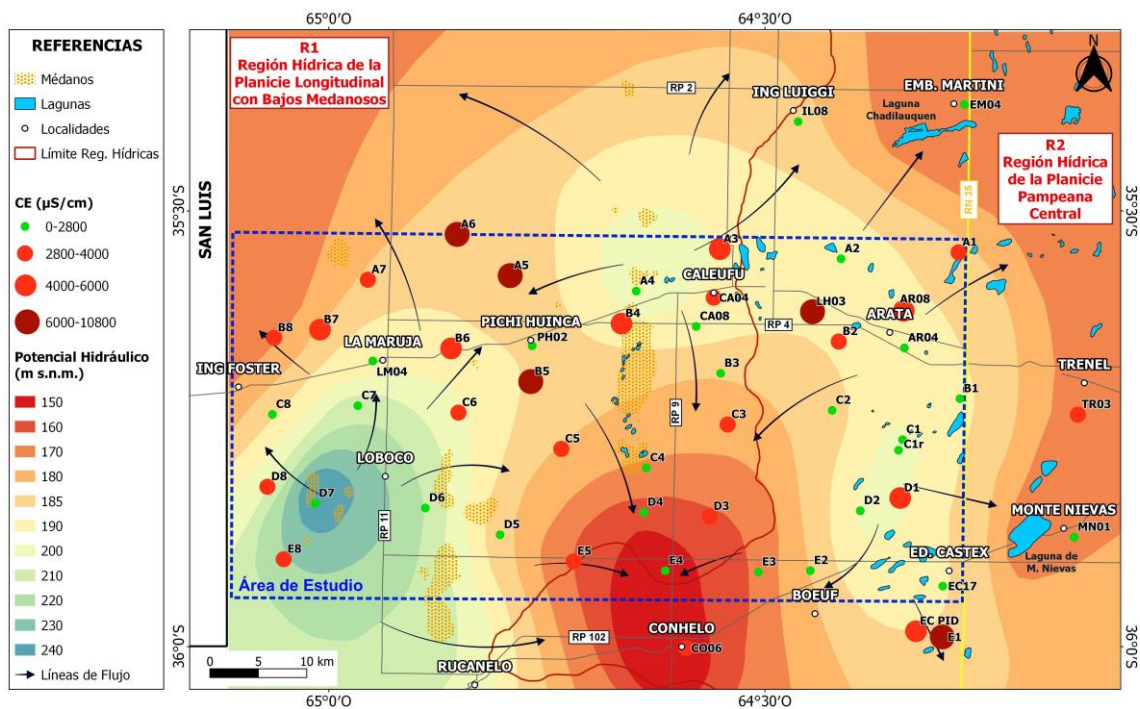


Figura 80. Distribución espacial de los valores de conductividad eléctrica en el área de estudio y zona aledaña.

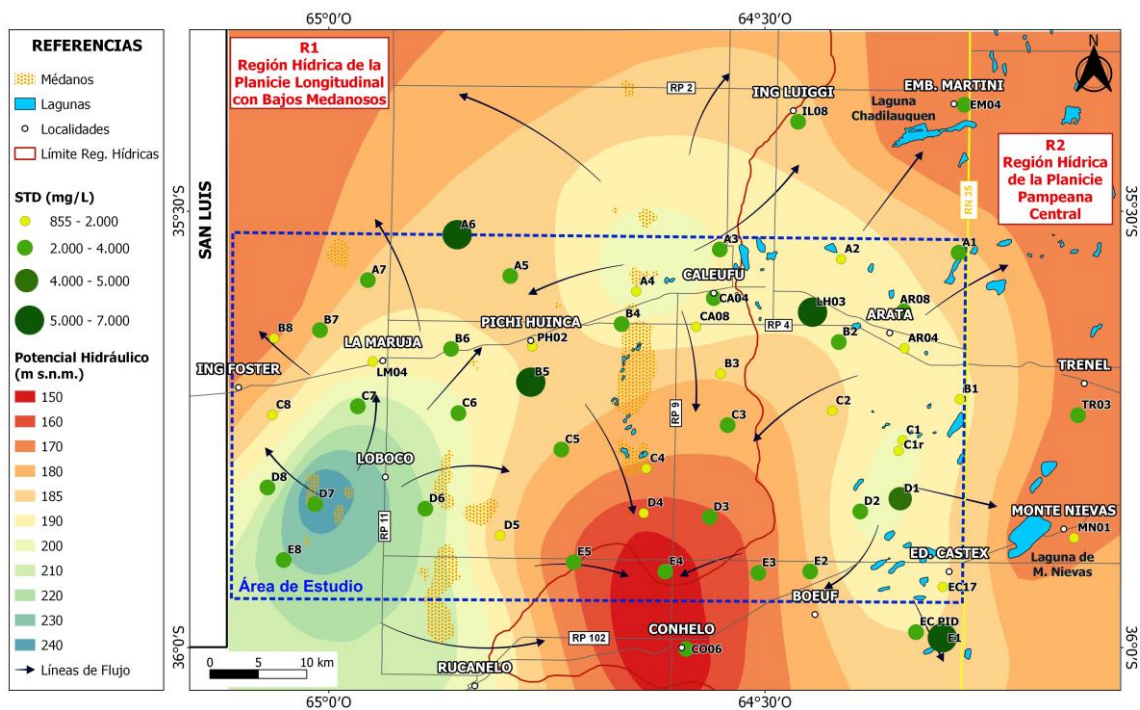


Figura 81. Distribución espacial de los valores de sólidos disueltos totales en el área de estudio y zona aledaña.

En general se observan que los valores de menor CE y SDT se localizan en zonas donde se eleva el potencial hidráulico, específicamente al suroeste del área de estudio en la región R1 donde alcanza un potencial hidráulico de 240 m s.n.m., y al noreste del área, dentro de ambas regiones, alcanzando una carga hidráulica de 200 m s.n.m. La CE y los SDT se ven aumentados en gran

medida cuando el potencial hidráulico disminuye, ocurriendo hacia el noroeste del área en la región R2 donde los niveles estáticos registrados se encuentran a gran profundidad (>35 m) al igual que en la zona sur cercano a Conhelo.

Por sus características medanosas, las áreas de menor salinidad son las de mayor potencial hidráulico, ubicadas al suroeste y comportándose como zonas de recarga local al acuífero, generando una dirección del flujo en sentido norte y este, donde aumenta la salinidad a medida que los niveles se profundizan. En la parte central también se observan zonas de recarga local en áreas de médanos, cuyo flujo se moviliza hacia el sur, generando una segunda zona de descarga local (Conhelo) con una tendencia creciente de salinidad. En el área de la región R2, donde el potencial hidráulico se encuentra elevado, presenta una salinidad relativamente baja con algunas excepciones puntuales de mayor salinidad, probablemente por una mayor profundidad de las obras de captación como podría ser en el caso del pozo AR08, por un cambio de litología (arcilla) como es en el caso del pozo LH03 o por la influencia de una zona de descarga local (laguna) como es la situación del pozo E1.

10.2.2 Análisis de los componentes mayoritarios

En la hidroquímica existe una relación importante entre el pH y los iones bicarbonato y carbonato, dado que estos últimos les otorgan alcalinidad a las aguas naturales, determinando su capacidad para neutralizar ácidos generando una solución buffer. En condiciones naturales estos son capaces de precipitar fácilmente como CaCO_3 , dado que no son oxidables (Custodio y Llamas, 1983). Cuando el pH en aguas es menor a 8,3 se considera nula la presencia de carbonatos (CO_3^{-2}).

En el área de estudio el pH varió entre 6,8 y 8,9, los bicarbonatos variaron entre 279 y 1.238 mg/L, mientras que los carbonatos sólo fueron detectados en 7 muestras cuyo pH superaba el 8,3, registrando valores que variaron entre 8,6 y 60,1 mg/L. La región R1 presentó una mayor dispersión como se observa en la Figura 82, variando entre 6,8 y 8,9, representada por una mediana de pH 7,6. La mediana de la región R2 es de 7,9, levemente mayor, con una menor dispersión de datos (entre 7,1 y 8,4) y un diagrama con asimetría negativa, contraria al diagrama de la región R1. Todos los valores de pH se encuentran dentro de valores neutros a levemente alcalinos.

Por otro lado, se observa que el contenido de bicarbonatos en la región R2 registra concentraciones mayores que la región R1, con una mediana de 650 y 462 mg/L respectivamente. Estos resultados altos en bicarbonatos determinan aguas más alcalinas en la región R2, es decir, con un mayor comportamiento buffer. La región R1, si bien el contenido medio de bicarbonatos es menor, presenta valores atípicos en el diagrama de caja con concentraciones altas. Los pozos muestreados de la región R2 se caracterizan por ser en su mayoría

someros, por lo que este mayor contenido de bicarbonatos puede estar influenciado por una rápida recarga del acuífero freático, al igual que las muestras más bicarbonatadas de la región R1 (A4, A3 y B4) que también son pozos someros.

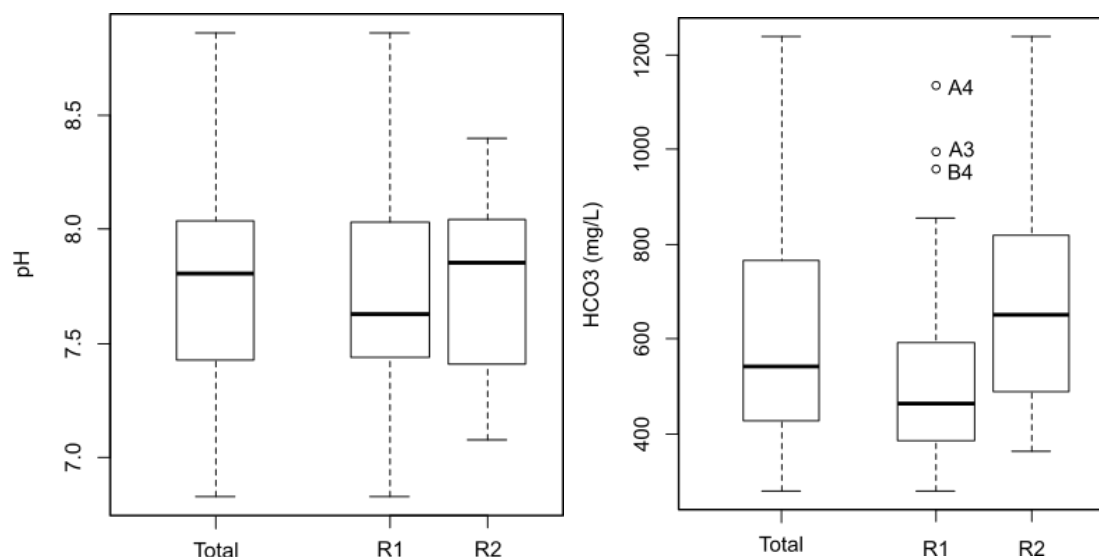


Figura 82. Diagramas de caja del pH y del ion bicarbonato, según el total de muestras y por región hídrica.

El anión cloruro es muy soluble y difícilmente puede precipitar, está asociado fuertemente al ion sodio y en aguas naturales no se oxida ni se reduce (Custodio y Llamas, 1983), otorgándole un carácter conservativo, y por ende considerado como buen trazador. El cloruro puede provenir de evaporitas o de rocas con origen marino, como también del aporte de las precipitaciones por disolución. En el del área de estudio se destaca una gran variabilidad en el contenido de este ion (Figura 83). La región R1 presenta una mediana de 375 mg/L, y una mayor concentración de datos entre 14 y 750 mg/L, pero registrando varios datos atípicos que alcanzan un contenido de cloruro máximo de 2.545 mg/L (A6). Por otro lado, la región R2 contiene una mediana menor de 216 mg/L y un diagrama con simetría positiva, indicando una acumulación del 50% de los datos entre 34 y 216 mg/L, presentando una mayor dispersión hacia valores mayores dado a las muestras LH03 y E1 que presentan en general una gran salinidad.

El catión sodio por su parte (Figura 83), está asociado fuertemente al anión cloruro y comparte características similares al mismo, presentando una alta solubilidad y dificultad para lograr precipitar (Custodio y Llamas, 1983), pudiendo provenir de evaporitas o rocas de origen marino como el cloruro, como también de la disolución de silicatos. En este caso, las regiones analizadas presentan una misma mediana de 570 mg/L pero distinta dispersión, siendo la región R1 la que alcanza una mayor variabilidad desde un mínimo de 117 a un máximo de 1.880 mg/L, mientras que la región R2 alcanza

un valor máximo de 1.574 mg/L determinando un bigote extenso hacia valores mayores debido a las muestras más salinizadas de la región (E1 y LH03).

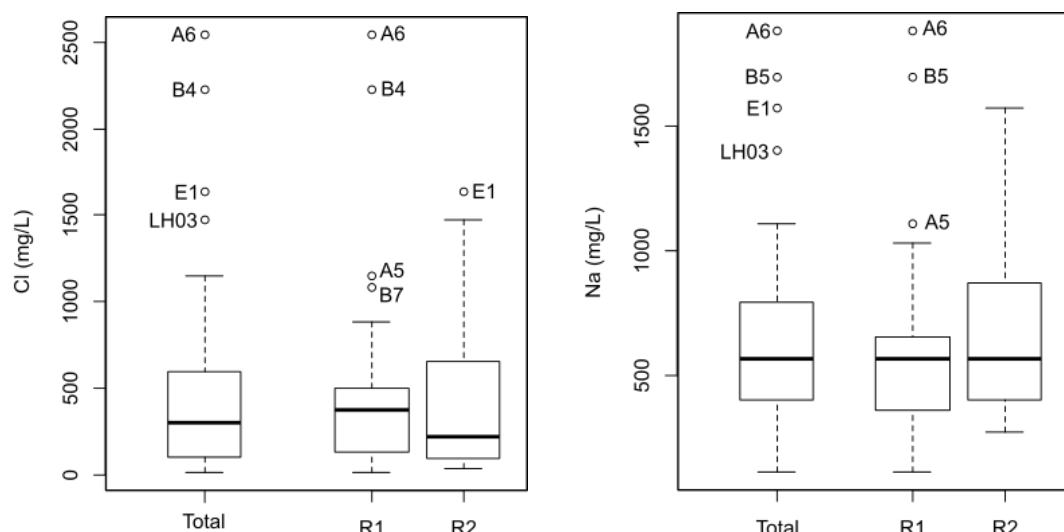


Figura 83. Diagramas de caja de los iones cloruro y sodio, según el total de muestras y por región hídrica.

El anión sulfato se caracteriza por una solubilidad moderada a alta y de difícil precipitación al igual que el cloruro y el sodio. Su aporte más importante proviene de la disolución de sales sulfatadas. En el área de estudio, la concentración de sulfato en el agua subterránea osciló entre 18 y 1.432 mg/L. A diferencia de los iones anteriores, el sulfato presentó una mayor dispersión en la región R2, con un rango intercuartil mayor aproximado de 700 mg/L alcanzando una concentración máxima de 1.432 mg/L y un mínimo de 107 mg/L (Figura 84). Mientras que los valores hallados en la región R1 se concentraron en un rango intercuartil aproximado de 300 mg/L presentando dos valores atípicos (A6 y B4), que a su vez son muestras con elevada salinidad.

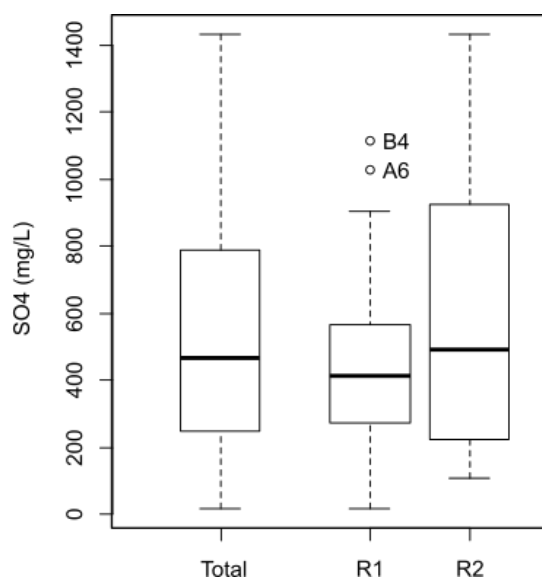


Figura 84. Diagrama de caja de sulfato, según el total de muestras y por región hídrica.

El catión calcio presenta una solubilidad moderada a alta y, al contrario que el resto de los iones mencionados, es de fácil precipitación principalmente como CaCO_3 , y se encuentra fuertemente asociado a los iones carbonato y bicarbonato. En el área de estudio, este ion presentó una gran dispersión, con un diagrama asimétrico positivo, cuyos primeros 50% de los datos se encuentran dentro del rango 1 y 26 mg/L, presentando valores *outliers* que alcanzan un máximo de 135 mg/L. La región R1 presenta una mediana de 27 mg/L con valores extremos que alcanzan los 135 mg/L en la muestra A3, la cual también alcanzó valores atípicos de bicarbonato. Por su parte, la región R2 presenta una mediana levemente menor de 20 mg/L, con una dispersión máxima de 133 mg/L (D1). En general, estas muestras de mayor concentración de calcio, son muestras que a su vez presentan una mayor salinidad en general.

El ion magnesio presenta características similares al calcio pero con una solubilidad mayor y una capacidad de precipitar más limitada. Proviene de la disolución de evaporitas, rocas carbonatadas y silicatos. En el análisis total de muestras presenta una gran variabilidad, cuya mayor dispersión se refleja en la región R1. En ésta la mediana es de 50 mg/L y el 93% de los datos se encuentran dentro del rango 1 y 185 mg/L, presentando dos valores atípicos registrados en las muestras A6 y A3. La región R2 presenta una mediana levemente menor de 37 mg/L y un 86% de los datos se hallan entre 8 y 85 mg/L, destacando tres datos atípicos (D1, ECPID y E1). Al igual que el ion calcio, estas muestras de mayor contenido de magnesio presentan también una mayor concentración iónica en general.

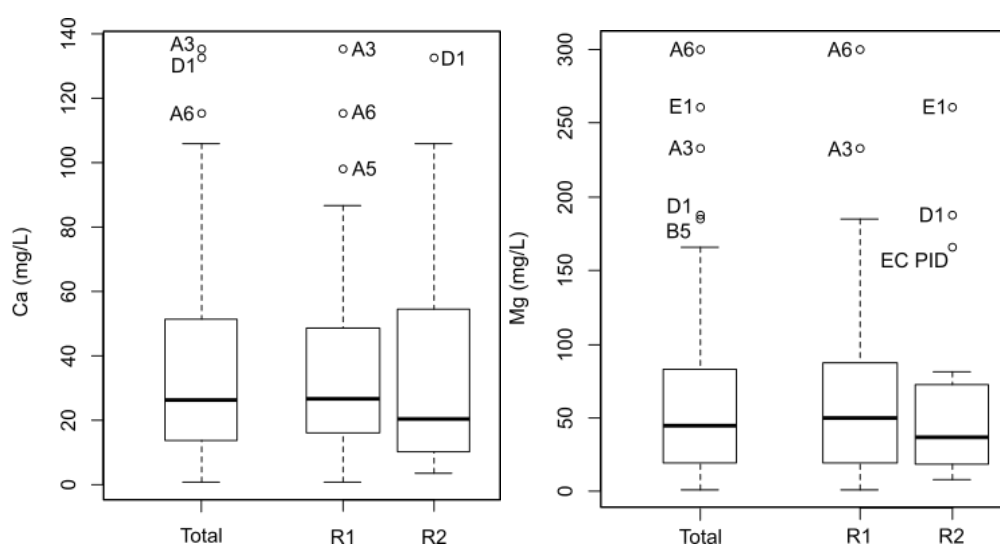


Figura 85. Diagramas de caja de calcio y magnesio, según el total de muestras y por región hídrica.

El potasio tiene características similares al ion sodio pero con la particularidad de que tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de

intercambio catiónico (Custodio y Llamas, 1983). Procede principalmente de la meteorización de feldespatos y disolución de evaporitas. En el área de estudio presentó una mediana de 12 mg/L, variando entre un valor mínimo de 4 mg/L y un máximo de 38 mg/L (Figura 86). La región R1 presentó una mediana de 14 mg/L con un rango intercuartil disperso entre 9 y 20 mg/L (50% de los datos) y presentando un dato atípico máximo de 38 mg/L en la muestra A6. En cuanto a la región R2, la mediana fue de 11 mg/L y presentó un rango intercuartil oscilante entre 7 y 16 mg/L, presentando un dato atípico en la muestra LH03 de 31 mg/L.

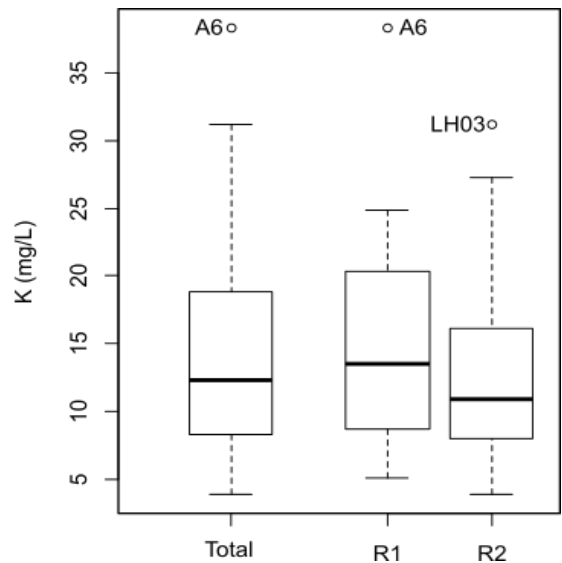


Figura 86. Diagrama de caja de potasio, según el total de muestras y por región hídrica.

10.2.3 Análisis de componentes traza

En cada uno de los 38 puntos muestreados en el área de estudio durante la campaña del año 2018, se extrajo una muestra de agua subterránea con el objetivo de analizar el contenido de elementos traza. Los mismos fueron realizados por *Activation Laboratories Ltd.* (Canadá) por Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) (Tabla VI del Anexo).

Se analizaron un total de 29 elementos traza, de los cuales sólo 9 fueron detectados con el método utilizado, mientras que el resto presentó valores por debajo del límite de detección. A modo informativo, se detalla que los elementos no detectados, o detectados en muy pocas muestras, fueron los siguientes: Ag, Al, Mn, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Li, Ni, Pb, Se, Sn, Te, Ti y U. A modo de resumen, en la Tabla 20 se detallan los resultados de los principales estadísticos obtenidos.

Tabla 20. Resumen estadístico de los elementos traza de las muestras extraídas en el acuífero de interés.

	n	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar
--	---	-------	---------	--------	--------	----------------

	n	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar
Ba (µg/L)	33	39,1	40,0	20,0	100,0	16,7
Si (mg/L)	38	33,9	34,8	14,4	45,3	6,5
Fe (mg/L)	38	0,2	0,1	0,0	1,5	0,3
Cu (µg/L)	11	31,8	17,0	3,0	147,0	42,1
Mo (µg/L)	36	63,6	31,0	6,0	347,0	73,0
P (mg/L)	24	0,04	0,03	0,02	0,11	0,0
Sr (µg/L)	38	852,6	545,0	20,0	4430,0	906,0
V (µg/L)	38	782,9	505,0	130,0	3760,0	754,0
Zn (µg/L)	21	51,0	18,0	5,0	239,0	70,4

El elemento que presenta una mayor concentración y detectado en todas las muestras analizadas fue el Si, presentando una media de 33,9 mg/L y variando en un rango de 14,4 a 45,3 mg/L. El Fe por su parte también fue detectable en un *n* total de 38 muestras, en concentraciones bajas con una media de 0,2 mg/L. También se detectaron en concentraciones importantes los elementos Sr y V. El Sr expuso una media de 852 µg/L, alcanzando un valor máximo de 4.430 µg/L, mientras que el V exhibió un valor promedio de 782 µg/L, alcanzando una máxima de 3.760 µg/L. En tanto, el Mo y el Ba se detectaron en concentraciones menores en un número alto de muestras, registrando una media de 63 y 39 µg/L y una máxima de 347 y 100 µg/L, respectivamente. En un número reducido de muestras se detectó Cu y Zn, con valores promedios de 31 y 51 µg/L respectivamente.

Estos mismos elementos fueron detectados en concentraciones similares por Ceballo (2020) en el norte de la provincia de La Pampa, en un área vecina al este de la zona de estudio. La mayor diferencia se observa en las concentraciones de V (detectadas con el mismo método), cuya media encontrada por esta autora es de 288 µg/L con una máxima de 1.420 µg/L (*n* = 72), siendo valores relativamente más bajos que los encontrados en el área de interés.

10.2.4 Distribución espacial y temporal del arsénico y fluoruro

Como se mencionó en capítulos anteriores, hidrogeológicamente dentro de la columna litológica, resultan de mayor interés los niveles superiores, correspondiendo en algunos sectores a un reducido espesor de sedimentos de la Formación Junín y principalmente a la Formación Cerro Azul. Esta última formación abarca la Llanura Chacopampeana, formando uno de los acuíferos de más importancia denominado Acuífero Pampeano, conformado litológicamente por sedimentos loésicos del Cuaternario.

Esta unidad hidrogeológica presenta un contenido de material de origen volcánico provenientes de erupciones Andinas. Uno de los orígenes del arsénico y el fluoruro se lo atribuye a la disolución del vidrio volcánico

proveniente de esta formación y a la desorción desde oxihidróxidos de hierro (Nicolli *et al.*, 1989), siendo tanto el arsénico como el fluoruro parte del “fondo natural” de la composición química del agua subterránea en la Llanura Chacopampeana (Blarasin, 2003).

En general, el arsénico y el fluoruro presentan un comportamiento anárquico muy complejo y difícil de predecir. La movilidad y distribución dependen principalmente de la dinámica temporal y espacial de las condiciones físicas, químicas y biológicas del medio por el cual circula.

Para realizar un análisis de la distribución espacial de arsénico y fluoruro, se utilizaron los datos obtenidos de 37 muestras extraídas de establecimientos rurales durante la campaña de 2018 e información aportada por la APA de 14 pozos de abastecimiento de las localidades ubicadas dentro del área de estudio (Tabla V del Anexo).

En la Tabla 21 se detallan los resultados de los principales estadísticos para la concentración de arsénico total y fluoruro en las 52 muestras analizadas. Se observa, un valor medio de fluoruro en la totalidad del área de 5 mg/L con una gran variabilidad entre 1,3 y 17 mg/L. En tanto que el arsénico total presenta una media de 233 µg/L variando entre un mínimo de 30 y máximo de 790 µg/L. Tanto el fluoruro como el arsénico total presentan valores problemáticos para consumo humano a analizarse en el capítulo 13 de Calidad De Agua.

Analizando los valores correspondientes a cada región, se puede observar en la Figura 87 una mayor dispersión de las concentraciones de fluoruro en la región R2, representada por una mediana de 7 mg/L y alcanzando un valor máximo de 17 mg/L en la muestra A2. En cambio, en la región R1 se observa que un 96% de las concentraciones se encuentran agrupadas en el rango 1,5 y 7 mg/L con un valor máximo de 10,1 mg/L. En tanto, las concentraciones de arsénico total exhiben una dispersión levemente mayor en la región R2 con una diferencia importante entre las medianas de cada región, con valores de 240 µg/L en la región R2 y 125 µg/L en la R1. Considerando que la primera se encuentra dominada principalmente por pozos de carácter somero, podría mencionarse entonces que los mismos presentan, en la mayoría de los casos, un contenido mayor de estos elementos, principalmente de fluoruro.

Tabla 21. Resumen estadístico de los valores de arsénico y fluoruro en la totalidad del área de estudio y por región.

	Área Total		R1		R2	
	F- (mg/L)	As (µg/L)	F- (mg/L)	As (µg/L)	F- (mg/L)	As (µg/L)
n	51	51	30	30	21	21
Media	5,1	233	3,8	217	7	255,7
Mediana	4,0	130	3,4	125	6,5	240
Mínimo	1,3	30	1,5	<30	1,3	30

	Área Total		R1		R2	
	F- (mg/L)	As (µg/L)	F- (mg/L)	As (µg/L)	F- (mg/L)	As (µg/L)
Máximo	17,1	790	10,1	690	17,1	790
Desv. Estándar	3,4	202,8	1,9	193,5	4,2	218,2

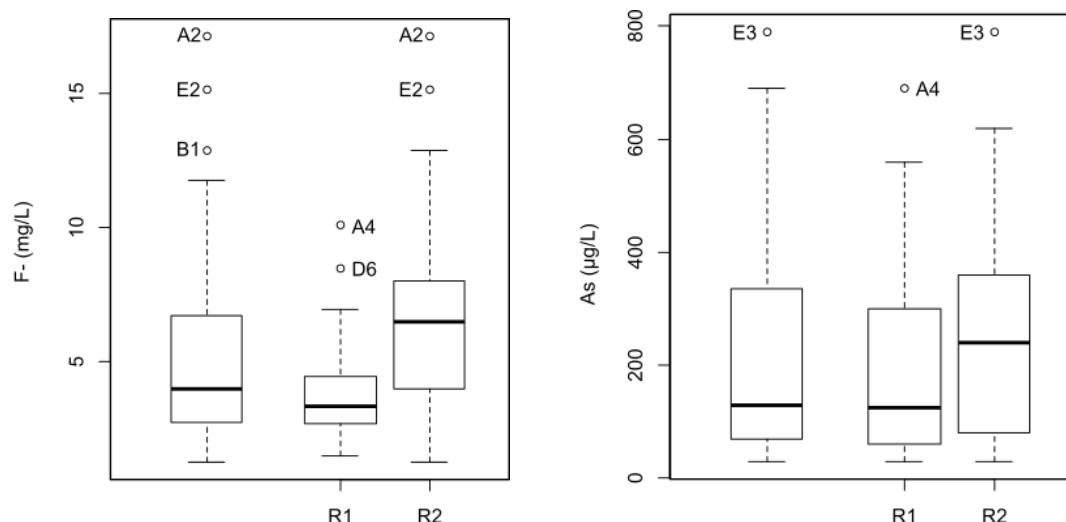


Figura 87. Diagramas de caja de fluoruro y arsénico, según el total de muestras y por región hídrica.

La distribución temporal del arsénico y el fluoruro es posible analizarla dado a un continuo seguimiento hidroquímico de los pozos de abastecimiento de las localidades por parte de la APA. Esta entidad pública y provincial realiza un muestreo periódico en estas perforaciones, con el fin de ejercer un monitoreo. En cada pueblo existe más de una perforación de abastecimiento, que presentan una distribución temporal similar entre sí, por lo que sólo se seleccionó una única perforación por pueblo y con el período más extenso. En los gráficos de la variación de los elementos en el tiempo se han marcado los límites admisibles para consumo humano correspondientes al Código Alimentario Argentino (CAA, 2021) con el objetivo de tener un valor de referencia (0,8 a 1,3 mg/L para el fluoruro, y 0,05 mg/L para el arsénico total).

En las Figuras 88 a la 94 se destacan una importante evolución en el tiempo en ambos elementos en todos los casos analizados. Particularmente, la localidad de Arata presenta los valores más altos de fluoruro en los pozos analizados, variando entre 7,17 y 8,6 mg/L. La segunda localidad con mayor registro de fluoruro es Eduardo Castex, registrando una mayor variabilidad en el tiempo, con un valor mínimo y máximo de 4,5 y 8 mg/L respectivamente. El pozo de la localidad de Pichi Huinca y el de Caleufú variaron en el tiempo entre 2,9 y 3,7 mg/L y 1,7 y 2,7 mg/L respectivamente, mientras que el de localidad de La Maruja la variación fue levemente menor, entre un mínimo y máximo de 1,8 y 2,3 mg/L. El pozo de Conhelo y el de Ingeniero Foster fueron los que registraron valores menores de fluoruro, variando entre 1 y 1,9 mg/L, y 1,3 y 1,8 mg/L respectivamente. Cabe destacar que todos los datos analizados superaron los valores admisibles por el CAA.

Con respecto al arsénico total, la localidad con el mayor registro y mayor variabilidad temporal de este elemento dentro del área de estudio es la localidad de Arata, alcanzando un máximo de 0,53 mg/L y un mínimo de 0,23 mg/L. Se observa en la Figura 88 un aumento notable para el período 2009-2010 y un posterior descenso leve hasta el 2017. La localidad de Pichi Huinca también presentó una variabilidad importante (entre 0,2 y 0,37 mg/L), alcanzando el máximo en el año 2009 para luego descender levemente hasta el 2017. Los valores registrados en La Maruja variaron entre un mínimo de 0,13 y un máximo de 0,32 mg/L de arsénico total entre 2004 y 2017, concentraciones similares a los de la localidad de Conhelo durante el período 2002-2017 (mínimo y máximo de 0,14 y 0,31 mg/L respectivamente). La variación del arsénico en la localidad de Eduardo Castex se mantuvo relativamente baja pero por encima de lo admisible por el CAA, con valores que variaron entre 0,05 y 0,15 mg/L. En tanto que las localidades de Ingeniero Foster y Calefú fueron las que registraron una menor concentración de arsénico total, fluctuando por debajo y encima del límite recomendado por el CAA en el tiempo (variación entre 0,04 y 0,18 mg/L en Calefú y 0,03 y 0,06 mg/L en Ingeniero Foster). Exceptuando estas últimas localidades, el resto se mantuvo por encima de lo recomendado durante todo el tiempo analizado.



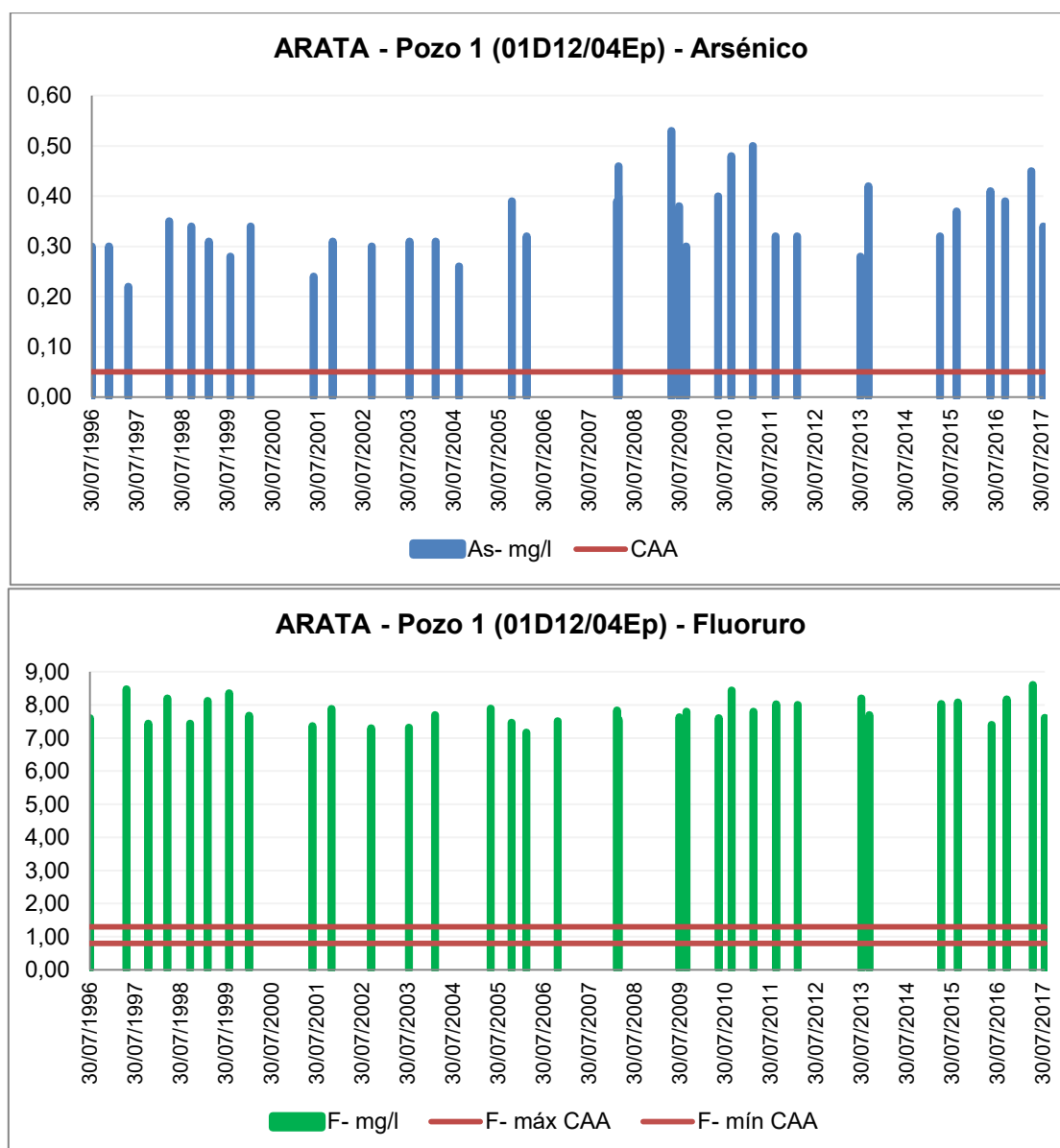


Figura 88. Ubicación y variación temporal de As y F⁻ en un pozo de abastecimiento de la localidad de Arata, para el período 1996-2017.

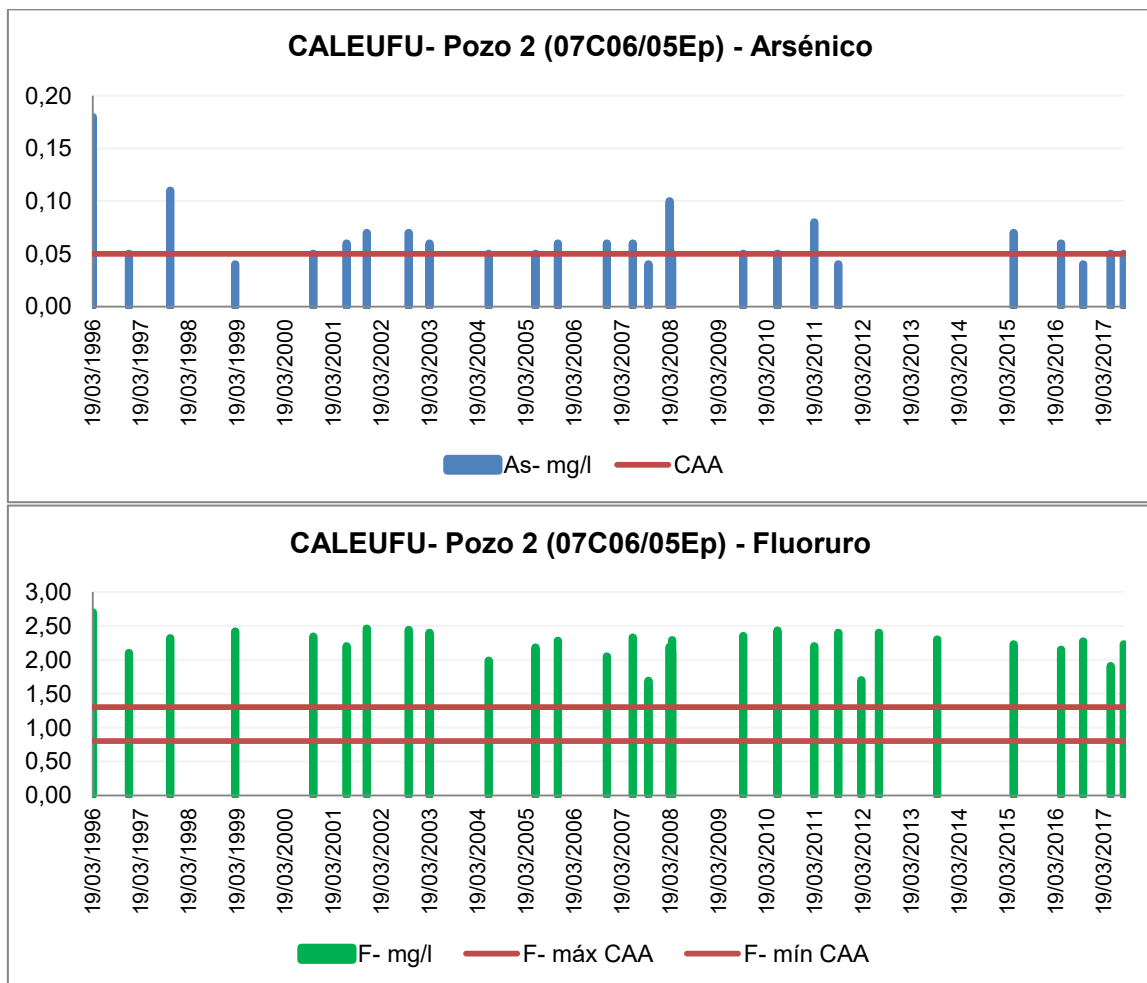
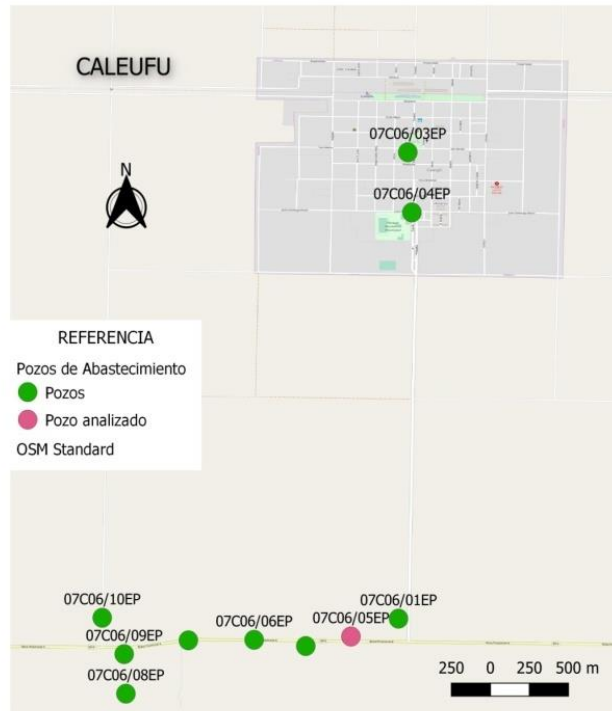


Figura 89. Ubicación y variación temporal de As y F⁻ en un pozo de abastecimiento de la localidad de Caleufú, para el período 1996-2017.

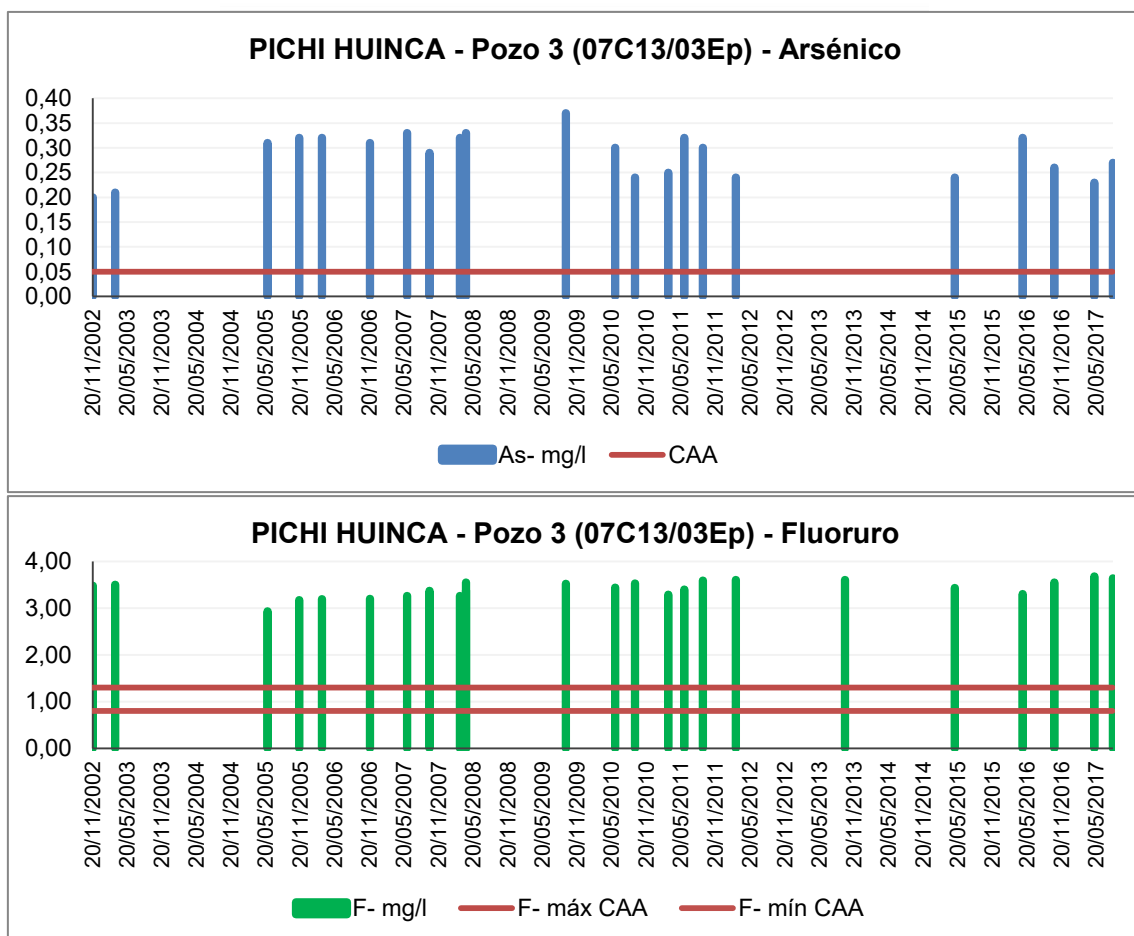


Figura 90. Ubicación y variación temporal de As y F⁻ en un pozo de abastecimiento de la localidad de Pichi Huinca, para el período 2002-2017.

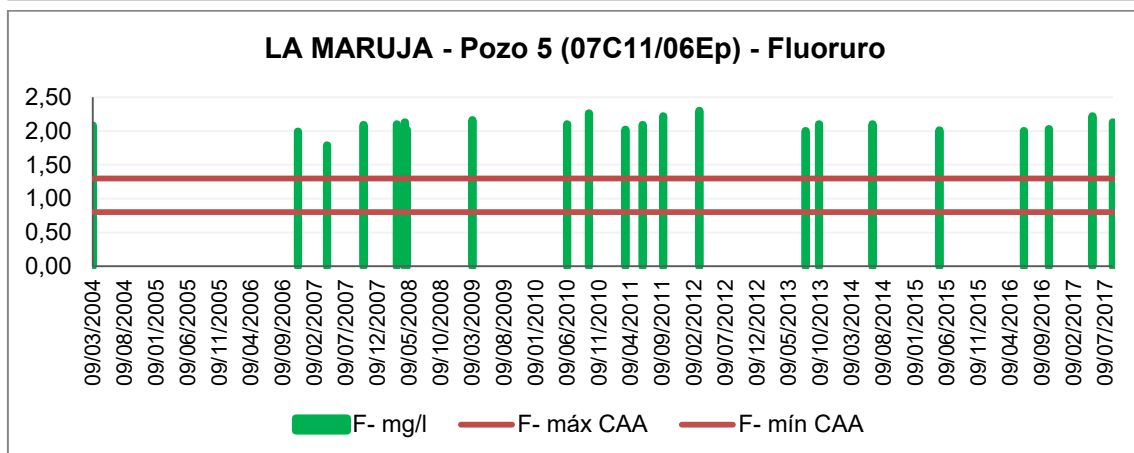
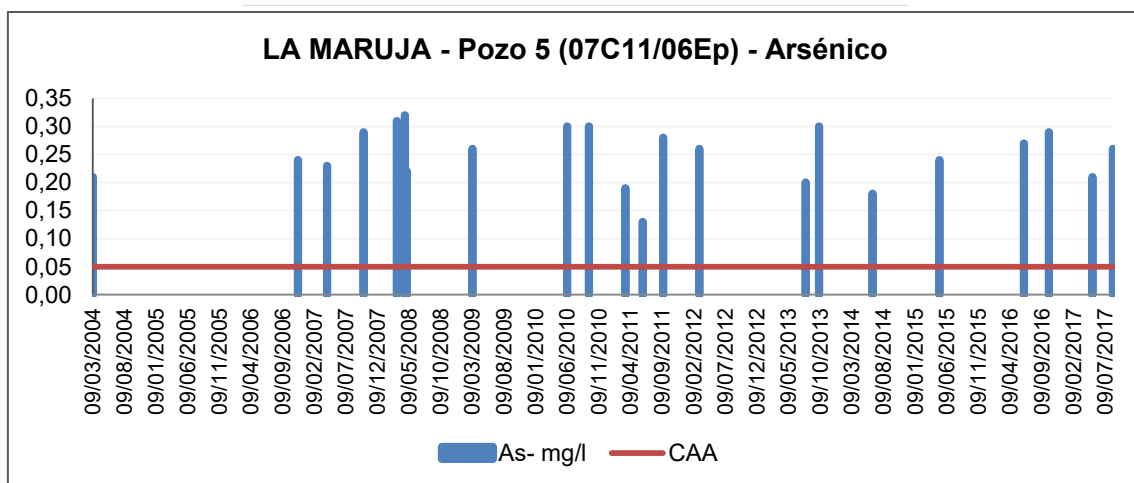


Figura 91. Ubicación y variación temporal de As y F- en un pozo de abastecimiento de la localidad de La Maruja, para el período 2004-2017.

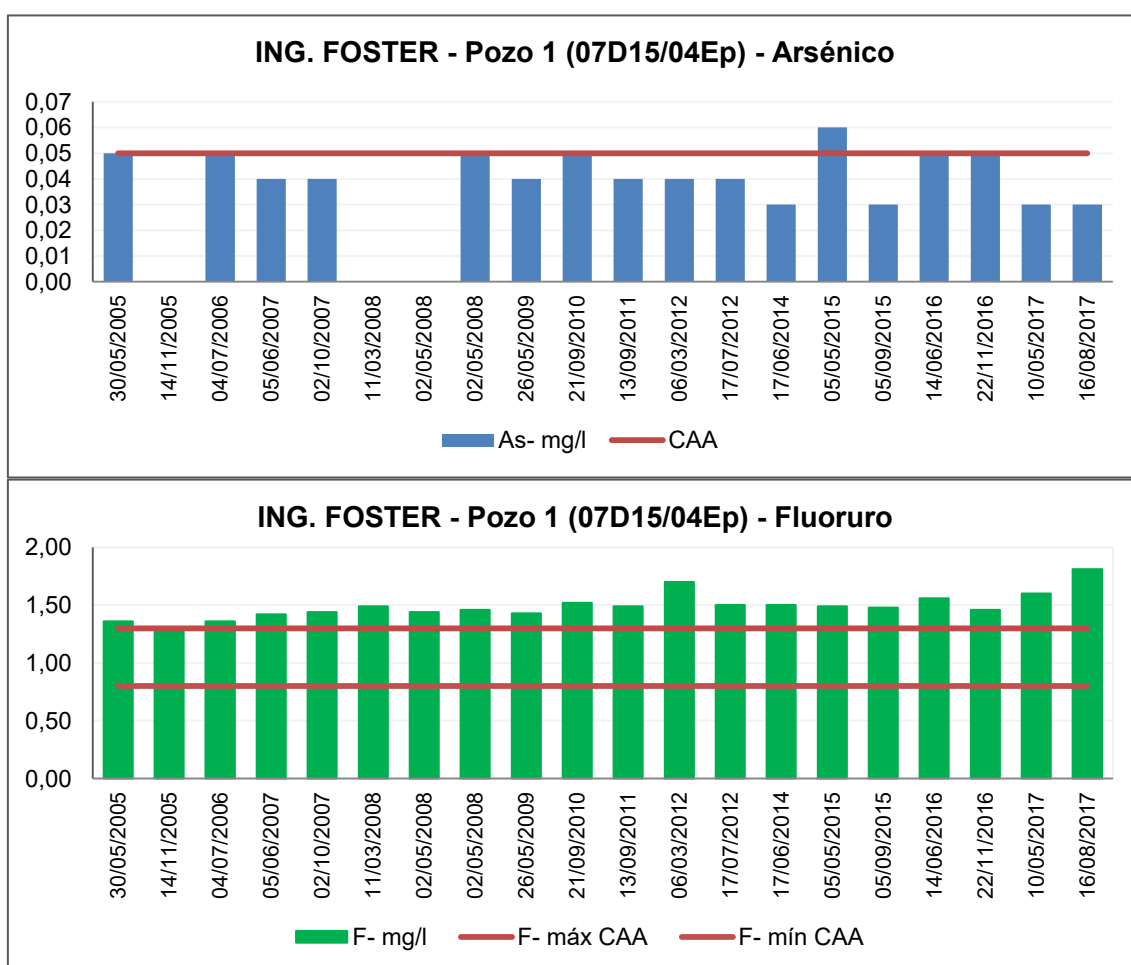
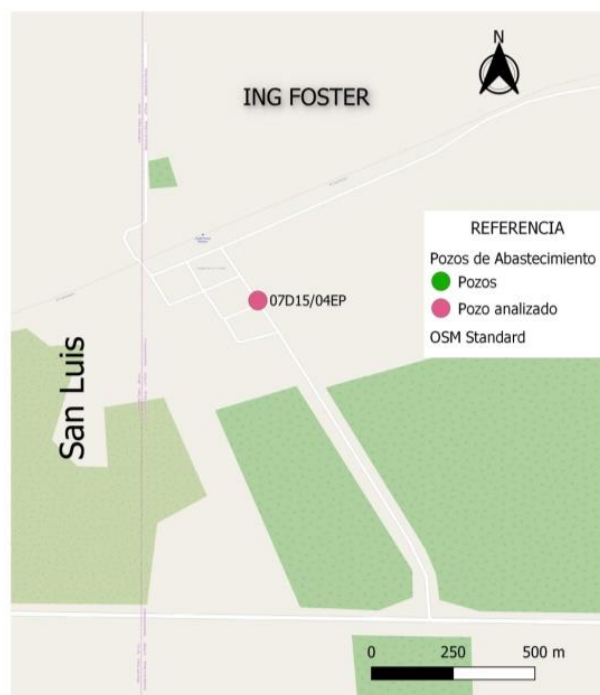


Figura 92. Ubicación y variación temporal de As y F- en un pozo de abastecimiento de la localidad de Ingeniero Foster, para el período 2005-2017.

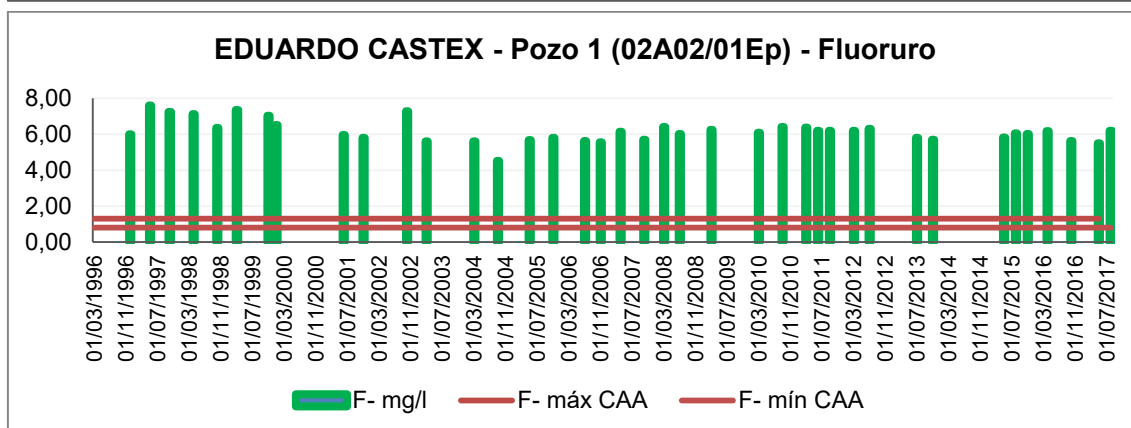
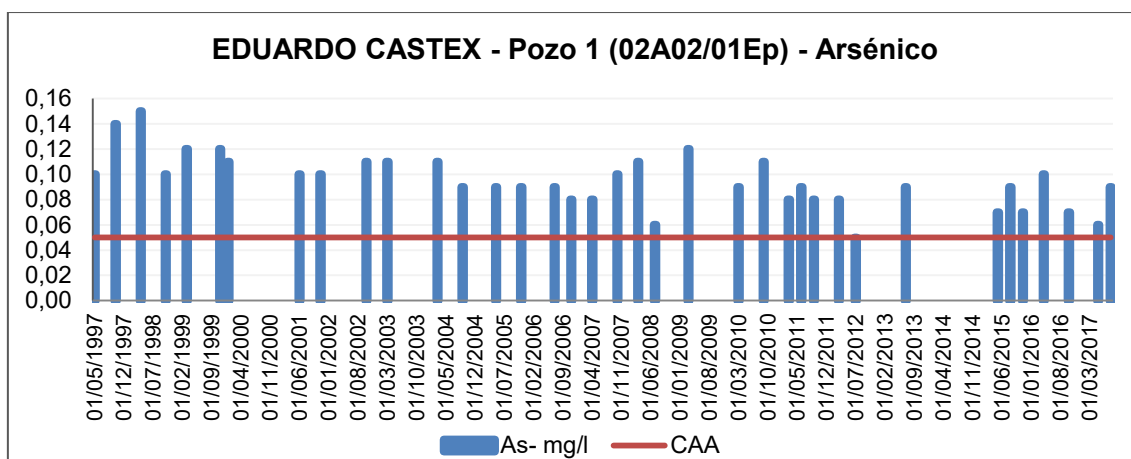


Figura 93. Ubicación y variación temporal de As y F- en un pozo de abastecimiento de la localidad de Eduardo Castex, para el período 1996-2017.

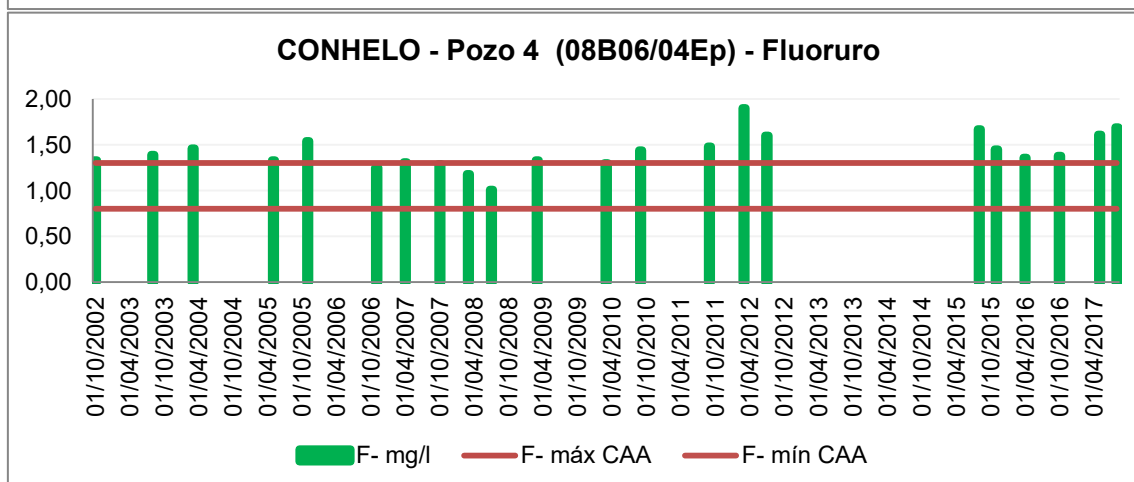
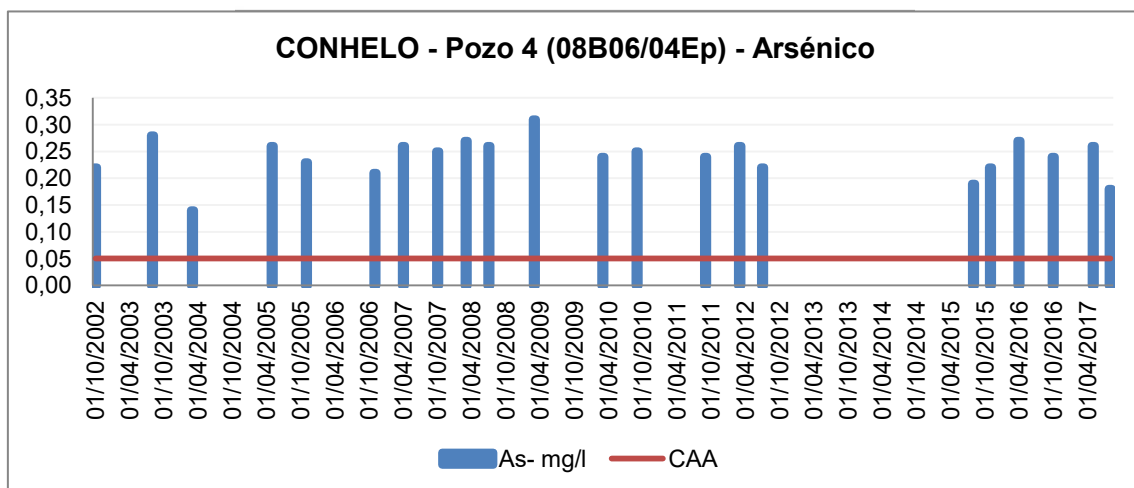
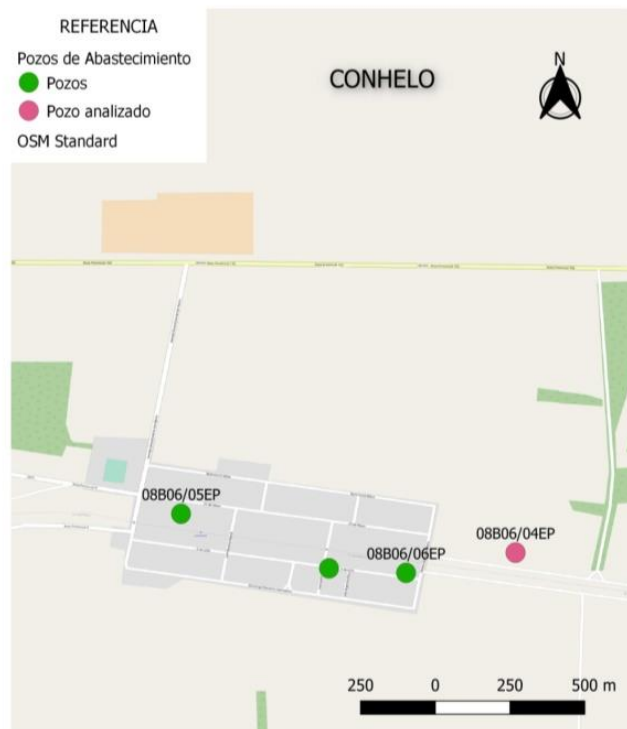


Figura 94. Ubicación y variación temporal de As y F- en un pozo de abastecimiento de la localidad de Conhelelo, para el período 2002-2017.

10.2.5 Especiación de arsénico

Específicamente el arsénico puede estar presente en el agua subterránea conformando compuestos de naturaleza orgánica o inorgánica. Estos últimos se presentan como especie disuelta formando oxianiones con los principales estados de oxidación As^{3+} y As^{5+} , formando principalmente arsenitos y arseniatos respectivamente y con menor frecuencia puede presentarse como As elemental y As^{3+} . La especie oxidada es H_3AsO_4 (ácido tetraoxoarsénico [V]), y su forma reducida es H_3AsO_3 (ácido trioxoarsénico [III]). Estos compuestos tienen diferentes productos de disociación, cuyas concentraciones relativas dependen de las condiciones del medio (Smedley y Kinniburgh, 2002), siendo el potencial redox (Eh) y el pH dos de los factores más importantes que controlan la especiación de arsénico y su movilidad.

En el agua subterránea pueden encontrarse ambos estados de oxidación, y las concentraciones y proporciones relativas de As^{3+} y As^{5+} dependen de la entrada de arsénico en el sistema, las condiciones redox y la actividad biológica. Por ejemplo, la presencia de arsenito puede ser mantenida en condiciones oxidantes por reducción biológica de arseniato (Smedley y Kinniburgh, 2002). Además, la cinética de las reacciones redox es muy lenta por lo que las relaciones $\text{As}^{5+}/\text{As}^{3+}$ observadas en muchas ocasiones no corresponden exactamente con las condiciones redox del medio, reflejando desequilibrio termodinámico (Kuhn y Sigg, 1993).

Respecto a la salud, de los compuestos inorgánicos de este elemento, el arsénico trivalente es considerado el de mayor potencial cancerígeno dado que su reactividad y toxicidad es mayor que el del arsénico pentavalente (OMS, 2011). Aun así, el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer considera a los compuestos inorgánicos del arsénico como cancerígenos para el ser humano.

Por otro lado, los compuestos de tipo orgánico del arsénico son los ácidos monometil-arsónico (MMA) y dimetil-arsónico (DMA) que, en general, no se encuentran en concentraciones significativas, pudiendo producirse por actividad biológica o como consecuencia de contaminación industrial (Smedley y Kinniburgh, 2002).

Se han realizado estudios de especiación de arsénico en el área efectuados por el Servicio Geológico Británico (Smedley *et al.*, 2000, 2002) que obtuvo una baja relación (alrededor de 0,017) entre As^{3+} y arsénico total en 108 muestras obtenidas en perforaciones públicas y particulares de los departamentos Conhelo, Maracó, Rancul y Trenal, que atribuye a las condiciones oxidantes del medio acuífero. Por su parte, Aullón Alcaine (2013) determinó en muestras de la zona de Quemú Quemú e Intendente Alvear, a través de modelación

geoquímica, que As^{5+} es la especie predominante para las condiciones de pH y potencial de óxido-reducción encontradas.

Para este trabajo se analizaron 8 muestras extraídas durante la campaña de noviembre 2018, y además se contó con 10 análisis antecedentes (UNLPam, 2015) obtenidos de pozos de abastecimiento de las localidades del área de estudio y aledañas durante el año 2015 (Figura 95) (Tabla VII del Anexo). Quedan distribuidas en total 10 muestras en la región R1 y 8 muestras en la región R2.

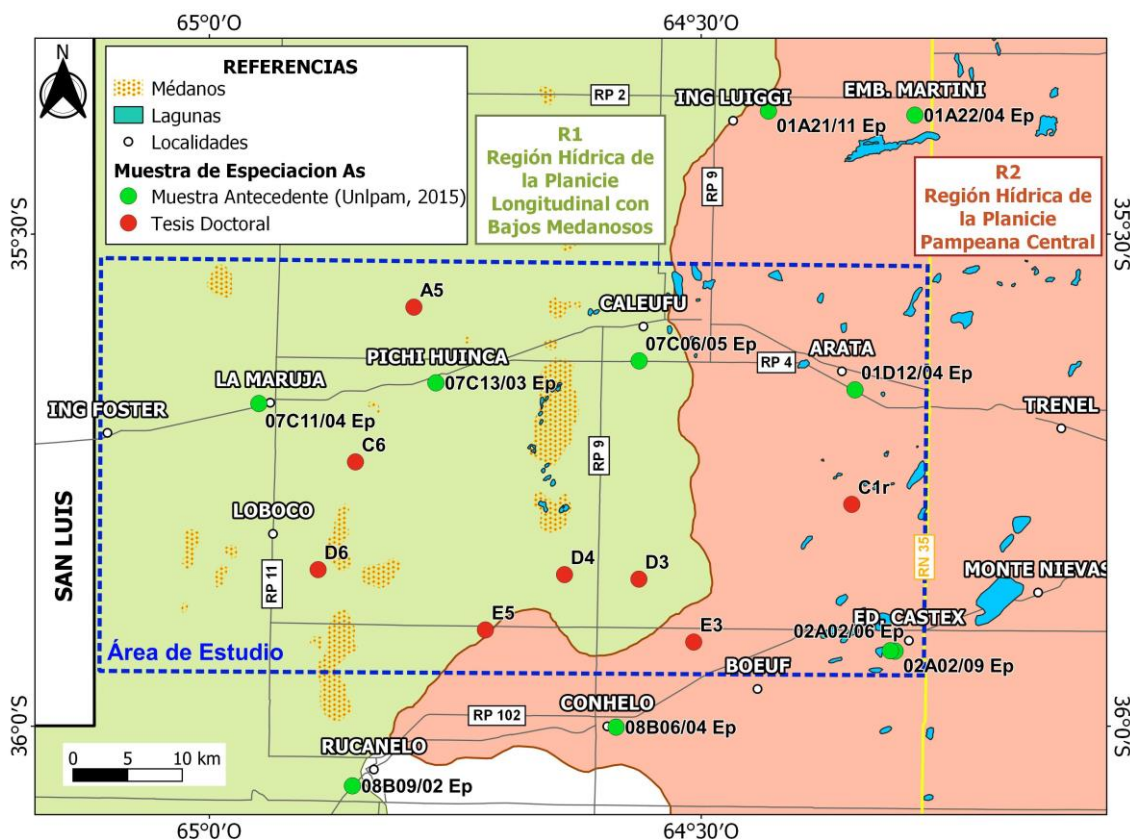


Figura 95. Ubicación de las muestras con análisis de especiación de Arsénico.

Tanto las muestras antecedentes como las extraídas para esta tesis fueron analizadas en el laboratorio *Activation Laboratories Ltd.* de Ontario (Canadá), con aplicación de técnicas combinadas de Cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC) y Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).

A partir de la Tabla 22 y coincidiendo con lo obtenido por autores anteriores (Smedley *et al.*, 2000, 2002; Aullón Alcaine, 2013), se pone en evidencia que el As^{5+} resultó ser el de mayor predominancia en la totalidad de la zona, presentando un promedio en el área de 322 $\mu\text{g/l}$ y un promedio de As total de 313 $\mu\text{g/l}$. Dicho resultado era esperable debido al carácter oxidante de las aguas subterráneas, cuyas concentraciones de oxígeno disuelto varían entre 4,7 y 6,3 mg/L (UNLPam, 2015). En la Tabla 23 se detallan los valores de As^{5+}

obtenidos en cada región, presentando un promedio mayor en la región R2 de 372 µg/L y un valor de 282 µg/L en la región R1. El valor máximo fue determinado en la región R2, alcanzando un valor de 887 µg/L.

Tabla 22. Promedio y rango de As⁵⁺ y As Total para un *n* de 18 muestras. Valores en µg/L.

Arsénico pentavalente (µg/L)			Arsénico total (µg/L)		
Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
322	39	887	313	57	790

Tabla 23. Concentración promedio, mínima y máxima de As⁵⁺ en cada región hídrica. Valores en µg/L.

	As ⁵⁺ (µg/L)	
	R1	R2
n	10	8
Promedio	282	372
Mínimo	39	128
Máximo	620	887

Por otra parte, el As³⁺ fue detectable únicamente en dos muestras, una correspondiente a un pozo de la localidad de Caleufú con un valor de 5 µg/L, y otra en un pozo de Pichi Huinca alcanzando el valor más elevado de 40 µg/L, representando un 8% y 11% del total de As en cada caso respectivamente. De modo similar, los compuestos orgánicos sólo se detectaron en estas dos localidades con concentraciones de 6 y 28 µg/L de DMA y 7 y 29 µg/L de MMA, correspondiente a Caleufú y Pichi Huinca respectivamente. Si bien su presencia no puede explicarse con la información obtenida en este trabajo, cabe mencionar que se conoce la existencia de microorganismos (bacterias y hongos) capaces de obtener energía a partir de la reducción de As⁵⁺ a As³⁺, acompañada de una biometilación con generación de MMA y DMA (Diorio *et al.*, 1995).

10.2.6 Análisis de correlación lineal

Se realizó un análisis entre los componentes mayoritarios y trazas del agua subterránea mediante el método de correlación parcial basado en el cálculo de la matriz de Pearson (Pearson, 1896). Los resultados de *r* proporcionan información respecto a la vinculación entre las variables analizadas, cuando se toman valores que se aproximan a +1 existe una alta correlación que es directamente proporcional entre ambas variables, mientras que si el resultado se acerca a -1 la correlación también es alta pero inversamente proporcional. A medida que se acercan al valor 0, la correlación es menos significativa.

Los resultados obtenidos de la matriz de Pearson se encuentran en la Tabla VIII del Anexo. A partir de la misma se observa una relación directa entre los

parámetros indicadores de la salinidad como lo son CE, SDT y RS con valores entre 0,94 y 0,99. También se observa una correlación directa entre estos parámetros y los iones mayoritarios superior al 0,8 en la mayoría de los iones, exceptuando el catión Ca cuya correlación varió entre 0,76-0,78. El Cl y el Na fueron los iones que mayor correlación tuvieron con los parámetros de la salinidad (0,89-0,96). Como es de esperarse, el Cl y el Na presentaron una correlación directa de un 0,92, mientras que el SO₄ con los cationes Ca y Mg tuvieron una correlación directa de 0,719 y 0,724.

La dureza con los cationes Ca y Mg obtuvo una correlación de 0,962 y 0,991 respectivamente, y un valor de r entre cationes de 0,926. Además se observó una relación directamente proporcional entre el elemento traza Sr con los cationes Ca y Mg con un valor de 0,91 en ambas (Figura 96). Estos tres iones forman parte del grupo de los metales alcalinotérreos, los cuales determinan la dureza del agua por lo que podría guardar una relación entre ellos.

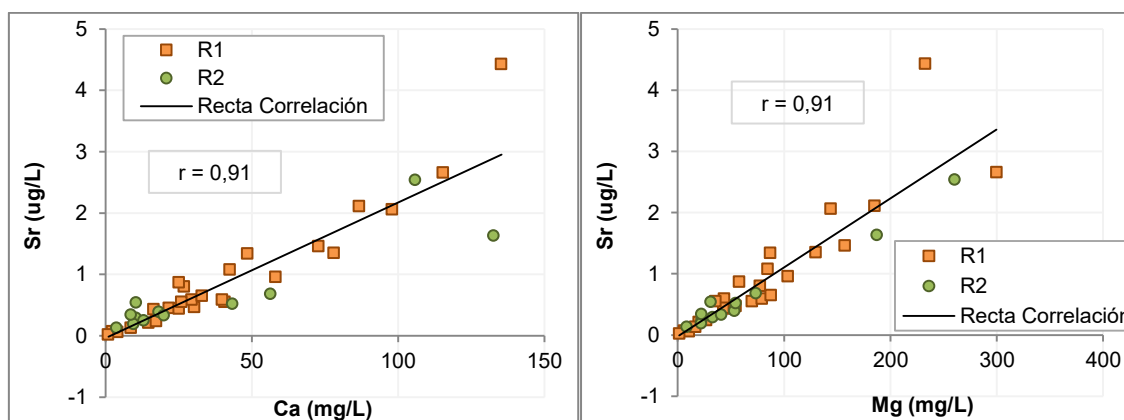


Figura 96. Correlación entre el elemento Sr y los cationes Ca y Mg.

Entre los elementos traza, una de las relaciones con mayor r es la obtenida entre el V con el F y el As, con valores de 0,72 y 0,57 respectivamente (Figura 97). Resultados similares han sido también registrados por estudios realizados en la provincia de Córdoba (Nicolli *et al.*, 1989; Blarasin *et al.*, 2014). La relación entre el F y el As fue de 0,57 (Figura 99), mientras que la relación entre estos dos elementos y el HCO₃ fue de 0,70 y 0,46 respectivamente (Figura 98). El V también tuvo una relación relativamente alta con el HCO₃ de 0,54, al igual que con el pH con un valor de 0,62. El As y el F presentaron una relación relativamente baja con el pH de 0,38 y 0,3 respectivamente.

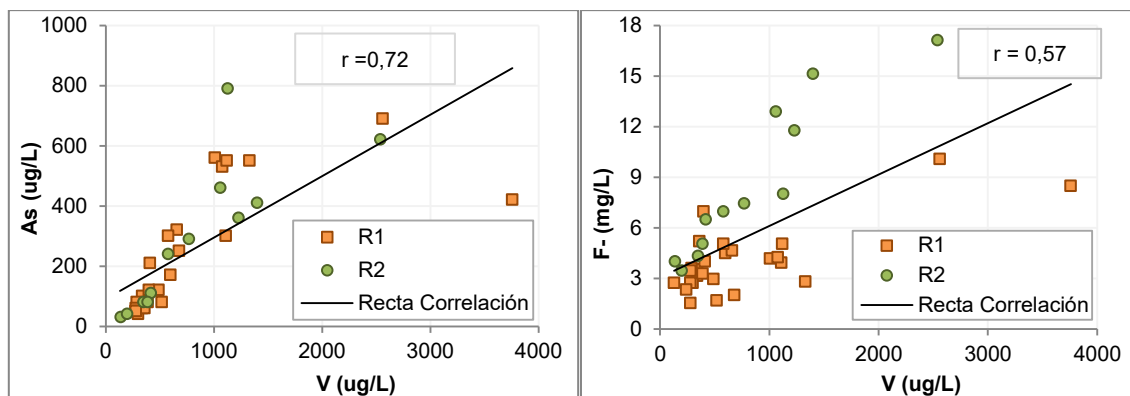


Figura 97. Correlación entre el V y los elementos As y F.

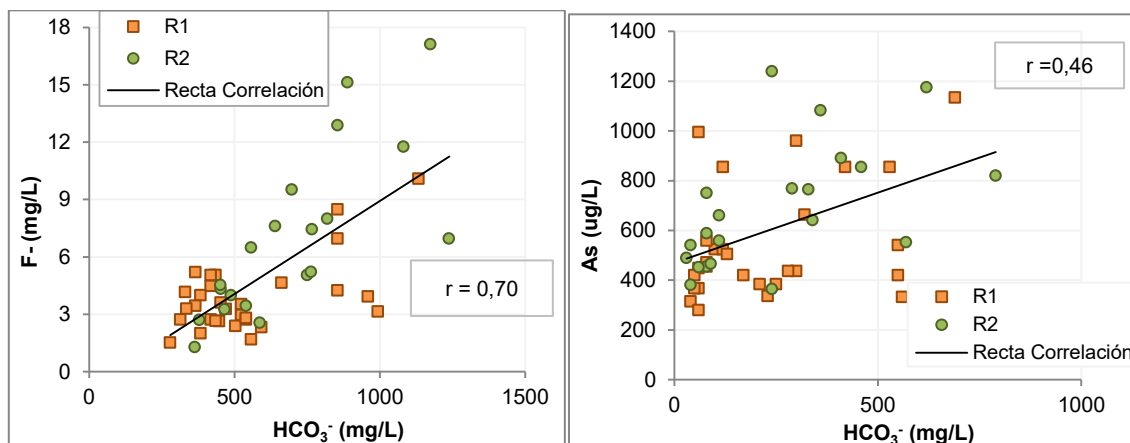


Figura 98. Correlación entre el HCO_3^- y los elementos F y As.

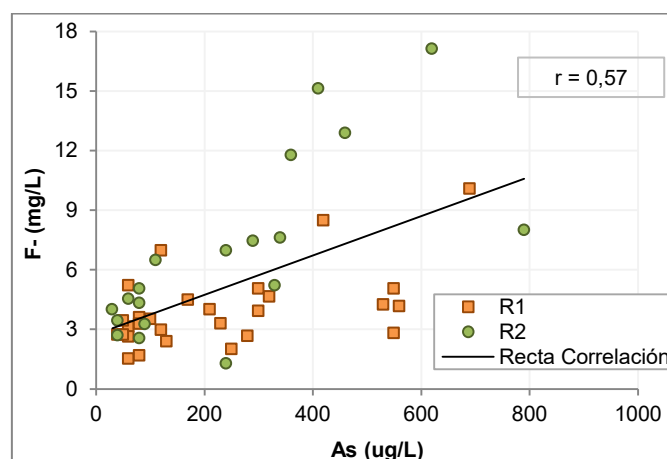


Figura 99. Correlación entre los elementos F y As.

El vidrio volcánico contenido en los sedimentos loésicos que forman parte de la Formación Cerro Azul y cubren el área de estudio, es uno de los principales generadores del arsénico y otros elementos traza en el agua subterránea de la Llanura Chacopampeana (Smedley *et al.*, 2000; Bocanegra *et al.*, 2002; Nicolli, 2006), siendo tanto el arsénico como el flúor parte del “fondo natural” de la composición química de este denominado Acuífero Pampeano (Blarasin, 2003). Smedley *et al.* (2000) señala que las altas concentraciones de arsénico se

deben, además de la presencia de minerales aluminosilicatados de cenizas volcánicas, a la desorción desde la superficie de óxidos secundarios amorfos de hierro y manganeso presentes en los sedimentos.

Según Mariño (2003), a partir de las descripciones mineralógicas en sedimentos loésicos realizadas en la zona de la localidad de General Pico, a unos 45 km al este del área de estudio señala que en la fracción limosa se encuentra la mayor proporción de vidrio volcánico, la cual es una sustancia amorfa y más inestable que el resto de los minerales presentes en el loess y puede ser afectado por los fenómenos de hidrólisis. El vidrio aporta por disolución, Na, Si, K, As, V, entre otros, mientras que los cationes bivalentes son retenidos más fuertemente en su estructura (Bonorino *et al*, 2008).

10.2.7 Clasificación hidroquímica

Las aguas subterráneas del área de estudio fueron estudiadas y tipificadas según la clasificación geoquímica propuesta por Custodio (1993), a partir de la cual se identificaron 9 tipos químicos de agua (Figura 100). El tipo de agua predominante en el área de estudio es la clase *bicarbonatada sódica* abarcando un 36% del total de las muestras y representa un 45% de las muestras extraídas en la región R2 (n=22) en la que predominan pozos someros (Tabla 24). La segunda clase más importante en el área y que representa un 27% del total de las muestras es la *clorurada sódica*, que a su vez, corresponde a un 33% de las muestras extraídas sólo en la región R1 (n=30), caracterizada principalmente por pozos profundos (Tabla 24). Además, cabe destacar un importante porcentaje de muestras clasificadas como *sulfatadas/bicarbonatadas sódicas* (9%) y *sulfatadas sódicas* (8%), de las cuales la primera clase se encuentra representada en la región R2 con un 14%, y la segunda tiene una mayor importancia en la región R1 representando un 10% de las de muestras extraídas. El resto de las muestras, dentro de la zona de estudio, se encuentran distribuidas en las clases *clorurada/sulfatada sódica* (6%), *clorurada/bicarbonatada sódica* (4%), *sulfatada/clorurada sódica* (4%), *bicarbonatada/sulfatada sódica* (4%) y *bicarbonatada/clorurada sódica* (2%).

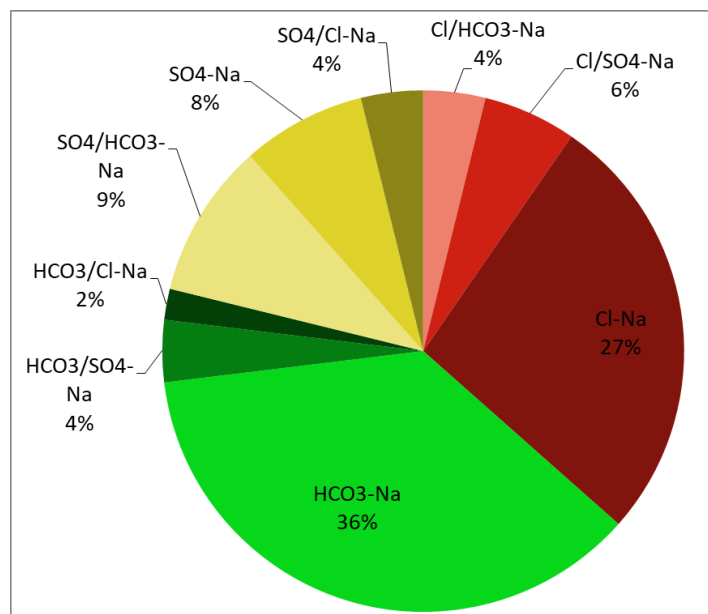


Figura 100. Diagrama de la distribución porcentual de los tipos químicos de las muestras de agua subterránea en la totalidad del área.

Tabla 24. Distribución porcentual de los tipos químicos en cada una de las regiones de interés.

TIPO QUÍMICO	R1 (%) n=30	R2 (%) n=22
Cl/HCO ₃ -Na	3	5
Cl/SO ₄ -Na	7	5
Cl-Na	33	18
HCO ₃ /Cl-Na	3	0
HCO ₃ /SO ₄ -Na	3	5
HCO ₃ -Na	30	45
SO ₄ /HCO ₃ -Na	7	14
SO ₄ /Cl-Na	3	5
SO ₄ -Na	10	5
TOTAL	100	100

En el diagrama de Piper de la Figura 101 se muestra la clasificación hidroquímica del agua subterránea teniendo en cuenta las regiones hídricas que involucra el área y la profundidad de los pozos. En cuadros amarillos se identifican las muestras extraídas de la región R1, caracterizada por pozos profundos, y en cuadros naranjas se identifican los únicos 6 pozos someros de esa misma región, mientras que las muestras pertenecientes a la región R2, caracterizada por pozos someros, se distinguen por círculos verde claro, y los únicos dos pozos profundos de esa misma región se destacan en color verde oscuro.

En general, se destaca una distribución de la gran mayoría de las muestras dentro de la clase de aguas *cloruradas y/o sulfatadas sódicas* y dentro de la clase de aguas *bicarbonatadas sódicas*, siendo dominada esta última por una

mayor cantidad de muestras pertenecientes a la región R2 y las muestras de pozos someros de la región R1.

Dentro del campo catiónico se observa una fuerte dominancia del sodio en toda el área de estudio, siendo la muestra A3 de la región R1 (pozo somero), la única que presenta una mayor concentración de magnesio. Respecto al campo aniónico se observa una amplia distribución, presentando una gran cantidad de muestras dentro del tipo mixta. Las muestras más evolucionadas dentro del tipo cloruradas son en su mayoría pertenecientes a la región R1 (n=6) y a algunos pozos de la región R2, siendo uno de ellos de carácter profundo (LH03). Mientras que del tipo bicarbonatada se encuentran en su mayoría muestras correspondientes a la región R2 (n=8) y algunas de la región R1, principalmente de los pozos someros (n=4). Existe una única muestra dentro del campo aniónico del tipo sulfatada correspondiente a la región R2 (A3).

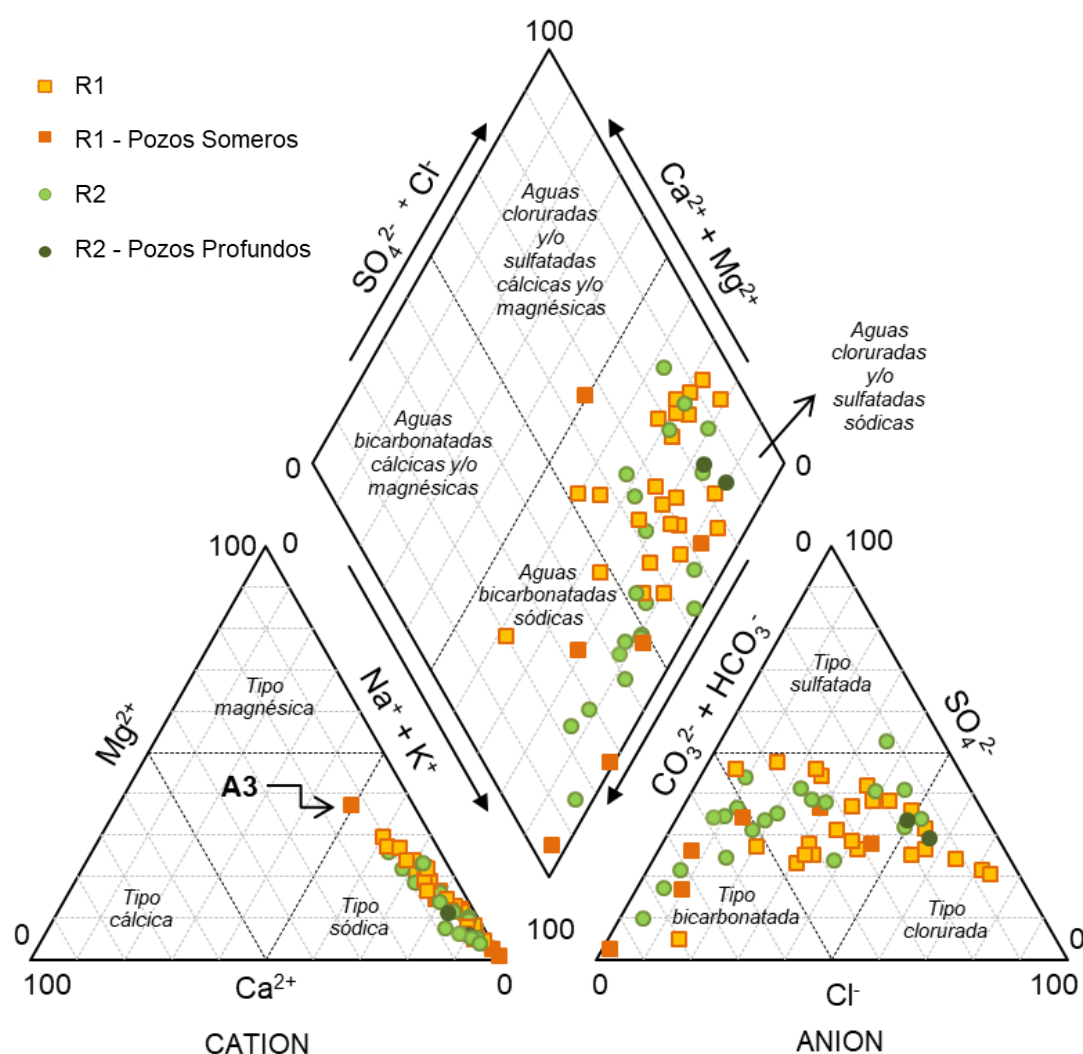


Figura 101. Clasificación hidroquímica del agua subterránea: diagrama de Piper.

En los diagramas de Schoeller Berkloff (Figura 102 y Figura 103) también se pueden distinguir valores máximos de sodio en todas las muestras del área de

estudio. Respecto a la dominancia de aniones, se observa una distribución muy variable en ambas regiones, resaltando levemente una mayor concentración de cloruro en las muestras de la región R1 y máximos pronunciados en los iones bicarbonato y sulfato mayormente en muestras de la región R2. Respecto a la salinidad, se observa levemente una tendencia de mayor salinidad en las muestras de la región R1, incluyendo a las muestras de pozos profundos de la región R2, y una tendencia a disminuir la salinidad en las muestras de pozos someros de ambas regiones.

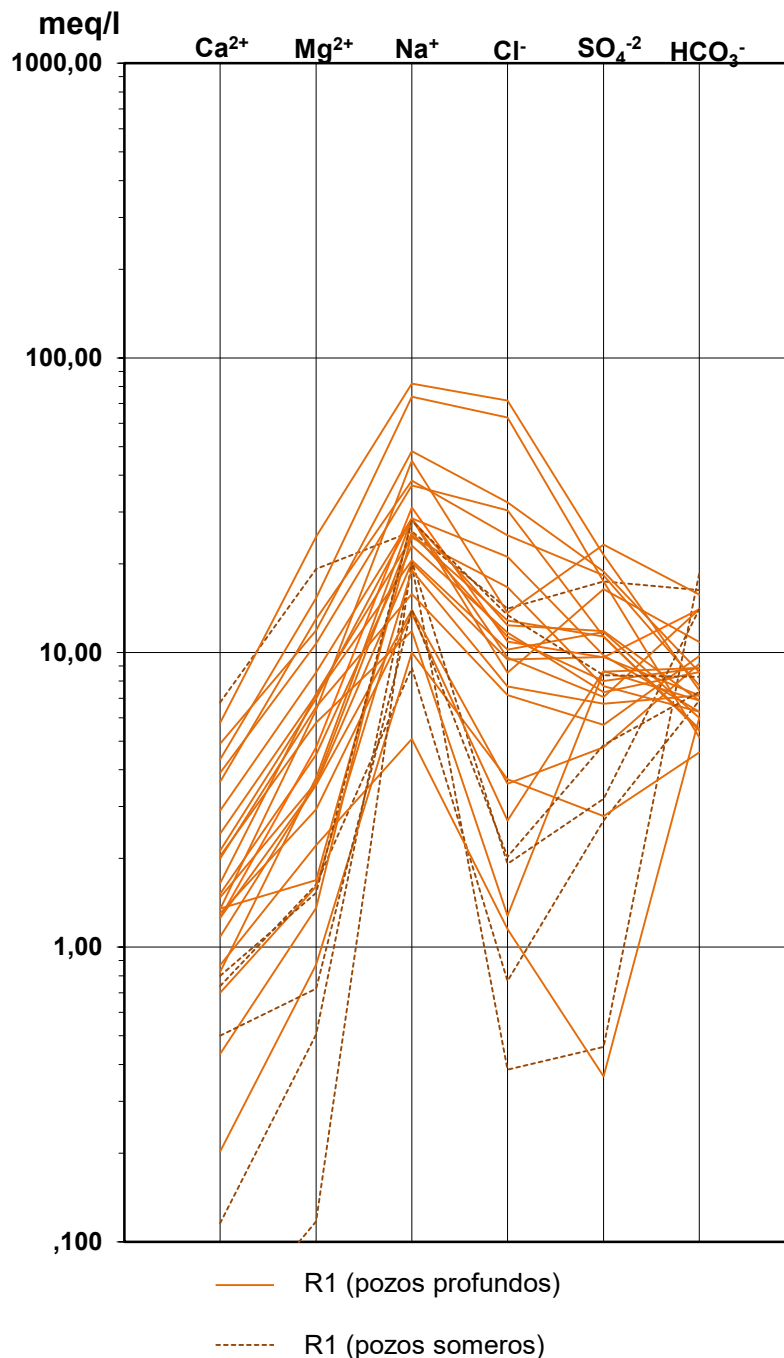


Figura 102. Clasificación hidroquímica del agua subterránea de la región R1: diagrama de Schoeller-Berkaloff.

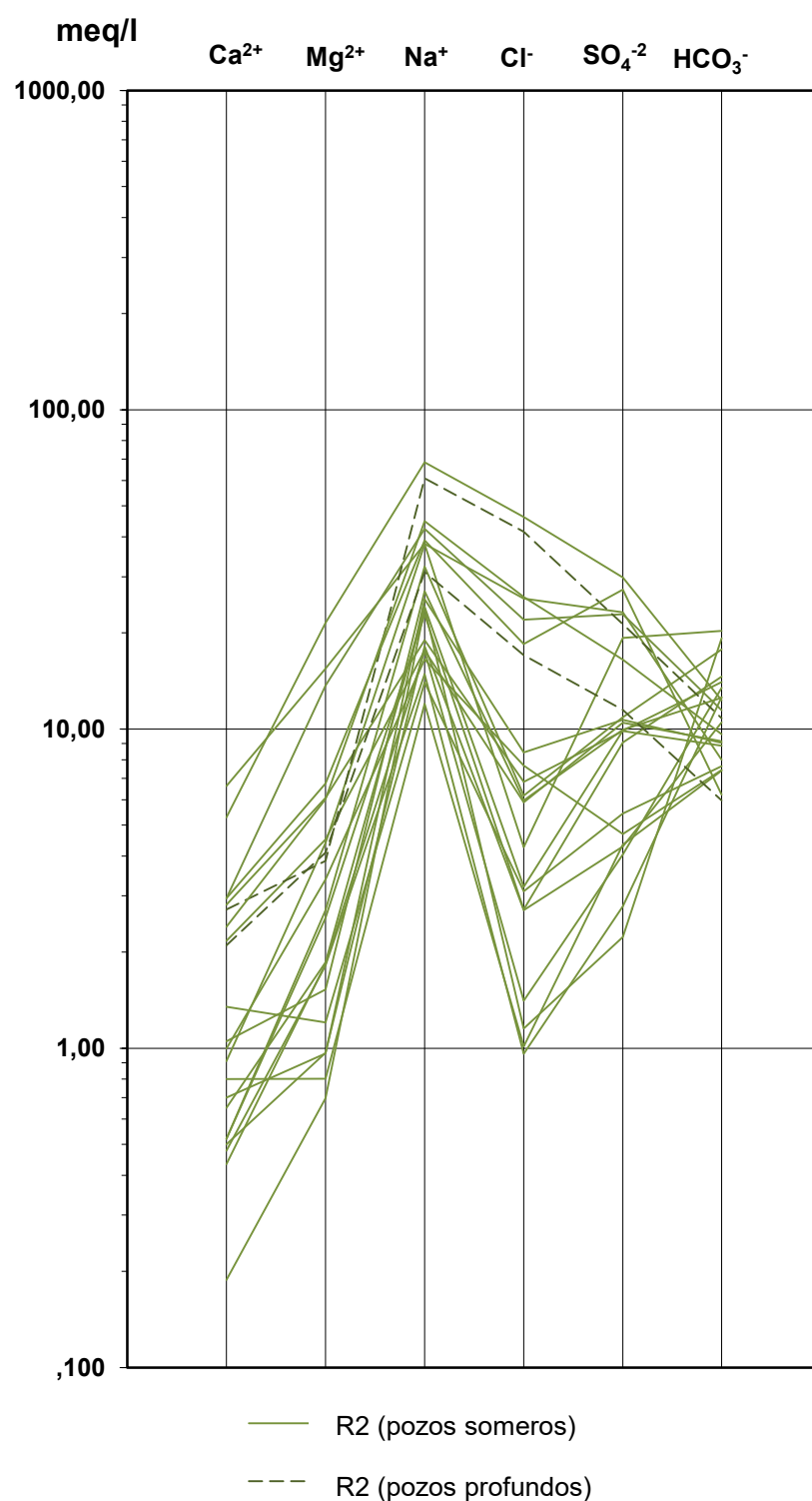


Figura 103. Clasificación hidroquímica del agua subterránea de la región R2: diagrama de Schoeller-Berkaloff.

Para una mejor perspectiva de la clasificación hidroquímica de las muestras relacionadas con su ubicación espacial en el área de estudio, se realizó un mapa de diagramas de Stiff teniendo como referencia el potencial hidráulico del agua subterránea de la zona y respectivas líneas de dirección del flujo (Figura

104). En la siguiente figura, al igual que en el resto de los diagramas hidroquímicos, se observa una gran variación en el campo aniónico en ambas regiones, definiéndose un total de 9 clases dónde se destaca una dominancia del ion sodio en el campo catiónico en todo el área de estudio. Las muestras de las clases *bicarbonatada sódica* y sus combinaciones mixtas con otros aniones, presentan una mayor distribución en las zonas de mayor potencial hidráulico del área de estudio, abarcando la franja más clara en la escala de colores.

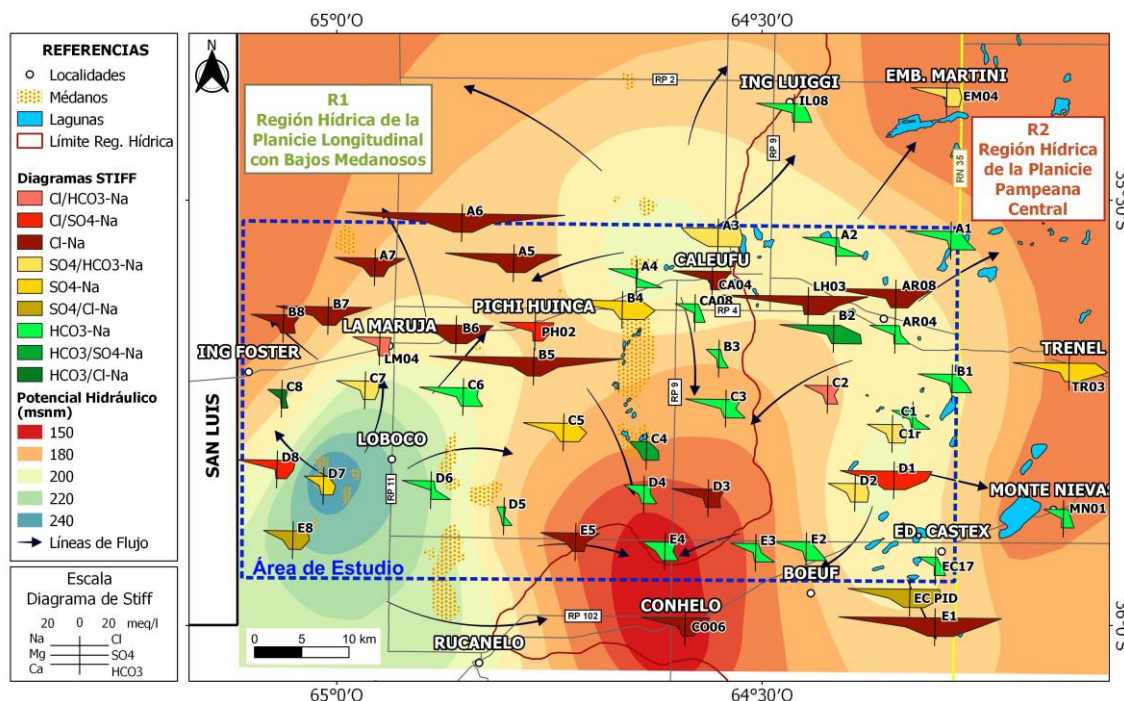


Figura 104. Clasificación hidroquímica de las muestras de agua subterráneas: diagramas de Stiff.

A partir de lo expuesto, se puede señalar que en la región R2 la mayoría de los pozos someros presentan una baja salinidad (expresado en el tamaño del diagrama) y una leve dominancia por muestras bicarbonatadas, sulfatadas/bicarbonatadas y cloruradas/bicarbonatadas. La razón puede deberse a una rápida recarga del acuífero ante eventos de precipitaciones debido a una reducida zona no saturada y a la disolución del CO_2 del suelo, que produce un aumento considerable de HCO_3^- cambiando el carácter geoquímico a aguas subterráneas bicarbonatadas o mixtas. Se exceptúan algunos puntos de muestreo cuyas aguas son cloruradas o sulfatadas/cloruradas, entre ellos el pozo profundo de la localidad de Conchelo CO06 que se encuentra en una zona de descarga local y cuyo potencial hidráulico disminuye notoriamente hasta los 150 m s.n.m.; como también el pozo profundo LH03, el cual litológicamente está constituido por un importante espesor de arcilla y limo arcilloso que le podría otorgar una mayor salinidad dado que el aporte de sales al agua es mayor. De la misma forma se exceptuaron los puntos de muestreo ECPID y E1 ya que pueden estar fuertemente influenciados por una laguna de descarga local ubicada en las

inmediaciones. Mientras que el punto de muestreo D1 no se sabe con seguridad cual es el motivo, pero se lo atribuye a su cercanía con los depósitos de residuos líquidos domiciliarios del casco del establecimiento agrario, pudiendo estar recibiendo una carga contaminante, apoyado también por el elevado valor de nitrato encontrado (79 mg/L).

Siguiendo el mismo orden de ideas, en la región R1 donde predominan pozos profundos, se observa una zona en el extremo noroeste cuyo potencial hidráulico disminuye de 190 a 170 m s.n.m., con una serie de pozos con elevada salinidad considerando el tamaño del diagrama y pertenecientes a las clases *clorurada sódica* y *clorurada/sulfatada sódica*. En el sector de mayor profundización del nivel piezométrico al sureste de la región, también predominan muestras *cloruradas sódicas*. Una característica importante de esta región es que en ella se encuentran distribuidos numerosos médanos longitudinales que actúan como zonas de recarga local del acuífero, por lo que el área presenta una importante cantidad de muestras pertenecientes a las clases *bicarbonatada sódica*, *bicarbonatada/sulfatada sódica*, *bicarbonatada/clorurada sódica*, y *clorurada/bicarbonatada sódica*. Asimismo, en el área de estudio se observan muestras con una mayor concentración de sulfato, destacando la zona de mayor altura piezométrica en el extremo suroeste de la región R1, que si bien no se cuenta con la descripción litológica de estas perforaciones, pero considerando que son pozos profundos, podría atribuirse al contenido de yeso de algunos de los estratos más profundos de la Formación Cerro Azul, como también la Formación Macachín dado su origen marino.

10.2.8 Análisis de las relaciones iónicas

La composición inicial del agua subterránea está ligada a la composición hidroquímica de las precipitaciones que le dieron origen, que luego es alterada por la interacción química entre el agua y los minerales de la fase sólida, procedente de procesos de disolución, precipitación, intercambio catiónico, como también procesos de hidrólisis. Para identificar las distintas reacciones fisicoquímicas y procesos modificadores de la composición química del agua subterránea de la región se utilizaron distintas relaciones iónicas y se determinaron los estados de saturación del agua con respecto a un mineral a través de los Índices de Saturación (IS).

La principal fuente de cloruro en el agua subterránea es el cloruro de sodio, proveniente de la disolución de halita, cuya relación es $rNa^+/rCl^- = 1$, mientras que el ion sodio, por el contrario, puede tener más de un origen que incluyen el intercambio iónico y la hidrólisis de silicatos (Hounslow, 1955). En la Figura 105 se observa una mayor abundancia de ambos iones en las muestras de la región R1 (círculo amarillo), y por ende, una menor concentración en las muestras de la región R2 (círculo verde) sumado a este sector algunas

muestras de la región R1, principalmente las de pozos someros. Se detecta una tendencia a presentar muestras con gran concentración en ambas regiones. Sin embargo, con respecto a la relación entre ambos iones, existe un enriquecimiento muy importante de sodio en todas las muestras analizadas con un valor promedio total en el área de estudio de 5,4 y un desvío estándar de 7,8.

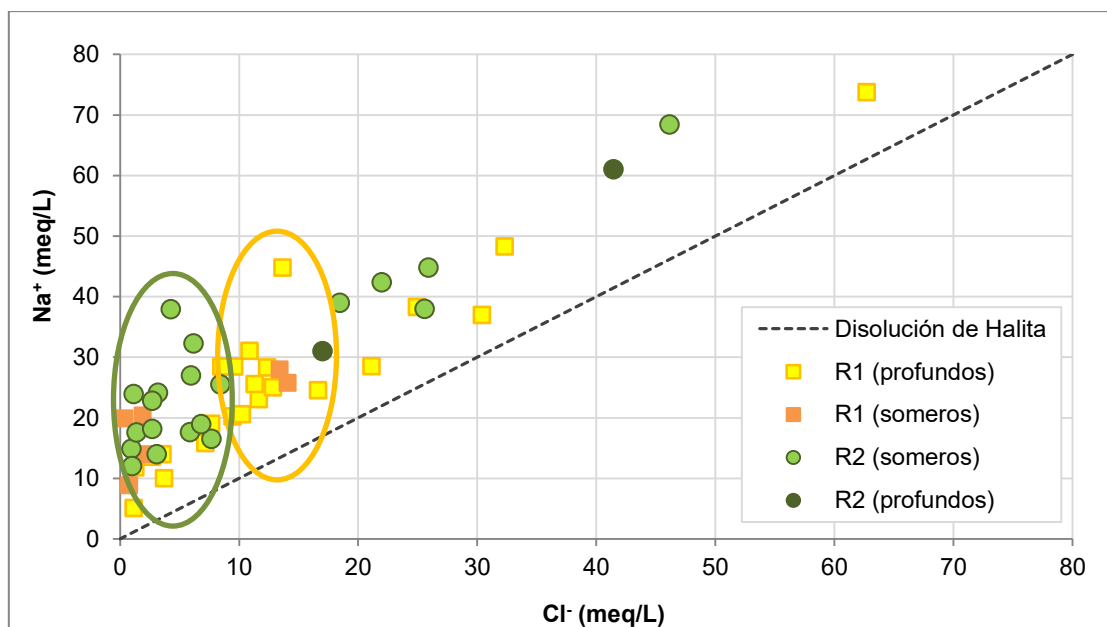


Figura 105. Relación entre los iones Na^+ y Cl^- en las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.

Por otro lado, similar a la relación anterior, se asume que la principal fuente de sulfato en el agua es producto de la disolución de yeso, por lo que al efectuar la relación $r\text{Ca}^{2+}/r\text{SO}_4^{2-}$ la misma debería ser igual a 1. Esta situación no se observa en la Figura 106, dado que se observa una deficiencia del ion calcio en la gran mayoría de las muestras, determinado por valores menores a 1. En tal sentido se permite evidenciar que existe un proceso de remoción de calcio en el acuífero, ya sea por precipitación de calcita o por intercambio catiónico.

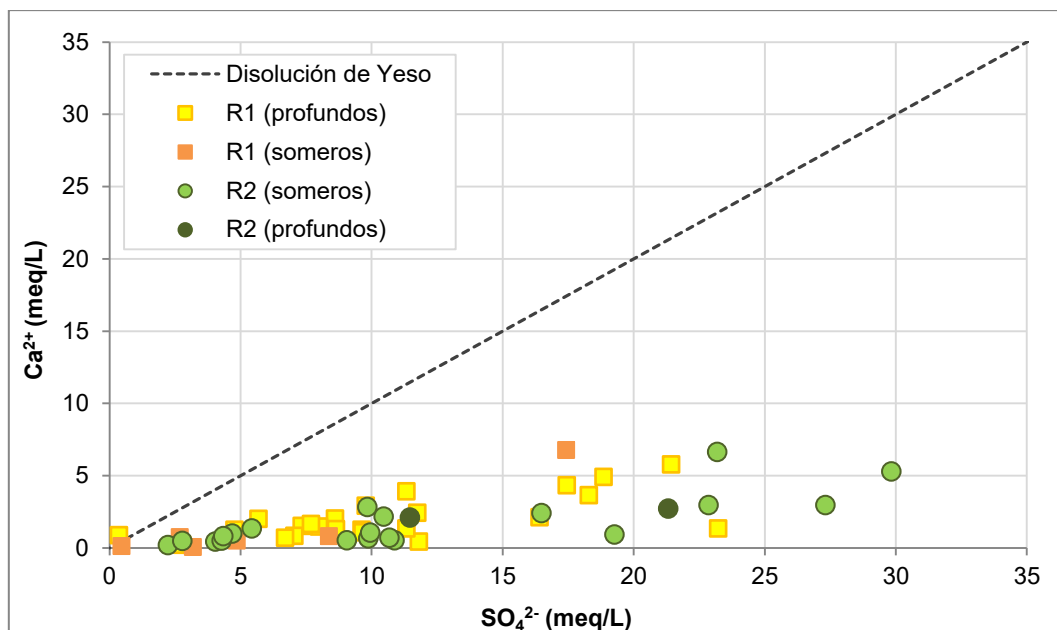


Figura 106. Relación entre los iones Ca^{2+} y SO_4^{2-} en muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.

Análogamente, si las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} fueran atribuidas sólo a la disolución de los minerales calcita, dolomita y yeso, la relación $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ sería cercana a 1 (Fisher y Mullican, 1997). En la Figura 107 se observa una deficiencia general de los iones calcio y magnesio en el área de estudio, siendo mayor en la región R2. De modo que esta relación, junto a las relaciones anteriores, indicarían que existe un proceso en el acuífero que remueve calcio y magnesio de la solución, adquiriendo iones de sodio.

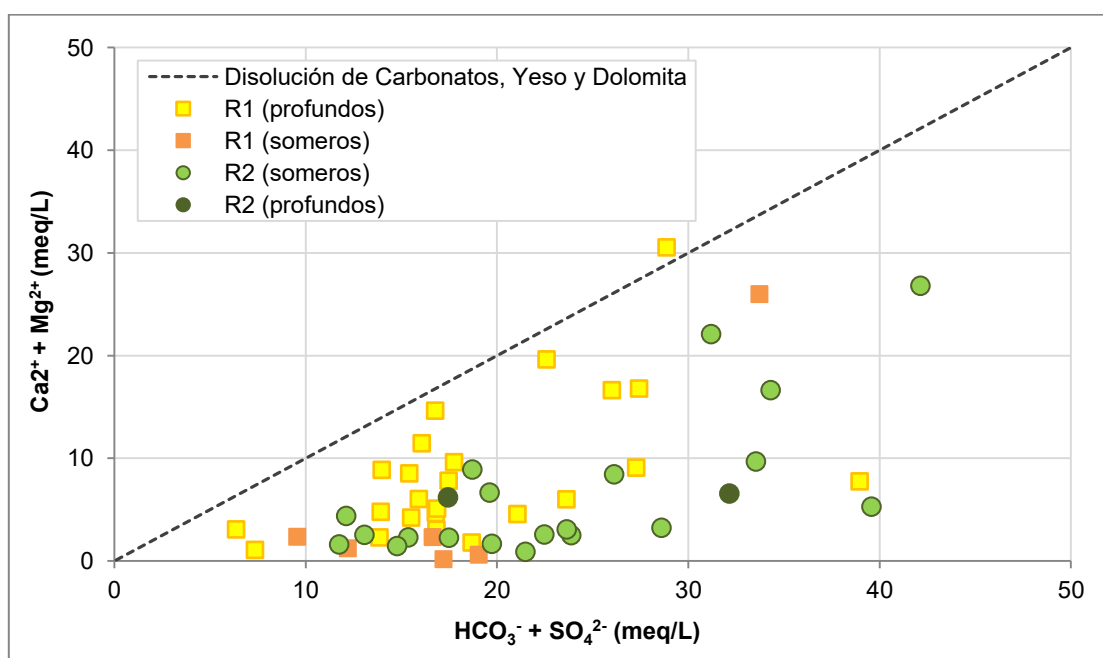


Figura 107. Relación $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.

Se determinó también el Índice de Cambio de Bases (ICB) o $rCl-(rNa^++rK^+)/rCl$, resultando negativo en todas las muestras, lo que permite inferir un proceso de intercambio de bases de ablandamiento, situación consistente con lo determinado en las relaciones anteriores.

Por otro lado se determinó la relación HCO_3^-/SiO_2 (mmol/L), que es utilizada para indicar si predomina un proceso de meteorización de silicatos o disolución de carbonatos, ya que esta última no libera sílice a la solución (Hounslow, 1995). Los valores de esta relación por debajo de 5 indican meteorización de silicatos y aquellos mayores a 10 indican disolución de carbonatos. Esta relación sólo se aplicó a un total de 38 muestras dado que no se disponía de valores de sílice en las restantes.

A su vez, teniendo en cuenta la relación anterior, se puede generar un cruce de interpretaciones si se tiene en cuenta la relación $rMg^{2+}/r(Ca^{2+}+Mg^{2+})$, ya que determina qué mineral es el que atraviesa un proceso de meteorización al definir si en la solución hay más o menos calcio o magnesio.

Como se observa en la Figura 108, teniendo en cuenta la relación HCO_3^-/SiO_2 , se observa que un 50% de las muestras presentan valores mayores a 10, indicando una dominancia del proceso de disolución de carbonatos, mientras que el resto no presenta un proceso dominante. En conjunto, considerando la relación $rMg^{2+}/r(Ca^{2+}+Mg^{2+})$, se determina que todas las muestras tienen una mayor concentración de magnesio por sobre el calcio, indicando una posible disolución de dolomita con precipitación de calcita o bien, un proceso de remoción de calcio de la solución como podría ser el intercambio catiónico.

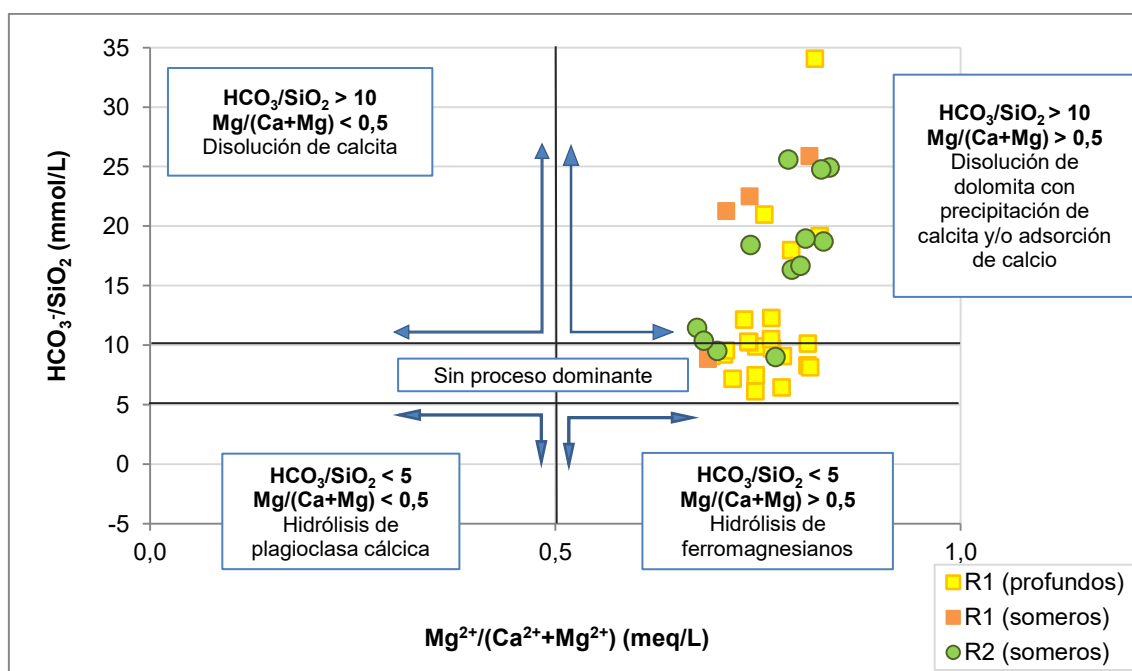


Figura 108. Relaciones HCO_3^-/SiO_2 y $rMg/(Ca+Mg)$ de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.

Otra relación iónica que involucra al contenido de sílice y sodio de la solución es $\text{SiO}_2/(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ (mmol/L), la cual permite comparar la concentración de sílice con el sodio proveniente de una fuente que no sea halita, ya que se resta el ion cloruro. De esta manera, el exceso de sodio puede ser debido a la meteorización de albita o a un proceso de intercambio catiónico, mientras que el potasio es proveniente de la meteorización de biotita. El total de las muestras analizadas ($n=38$) presentaron valores bajos con variaciones entre 0,02 y 0,21, indicando que la fuente adicional de sodio en el acuífero es proveniente a un proceso de intercambio iónico, reafirmado al tener en cuenta que las relaciones anteriores demostraron una remoción de calcio en la solución.

Por otro lado se efectuó la relación $(\text{rMg}^{2+} + \text{rCa}^{2+}) - (\text{rHCO}_3^- + \text{rSO}_4^{2-}) / (\text{rNa}^+ - \text{Cl}^-)$ que, según Hounslow (1995), si se alcanza una tendencia lineal es posible la ocurrencia del proceso de intercambio catiónico en la solución. Como se observa en la Figura 109, esta relación adquiere valores inferiores a 1 en la mayoría de los casos analizados, exceptuando la muestra A6 de la región R1, obteniéndose una línea de tendencia con pendiente negativa cercana a -1. Este aporte adicional de sodio genera una deficiencia de cationes provenientes de la disolución de carbonatos y yeso.

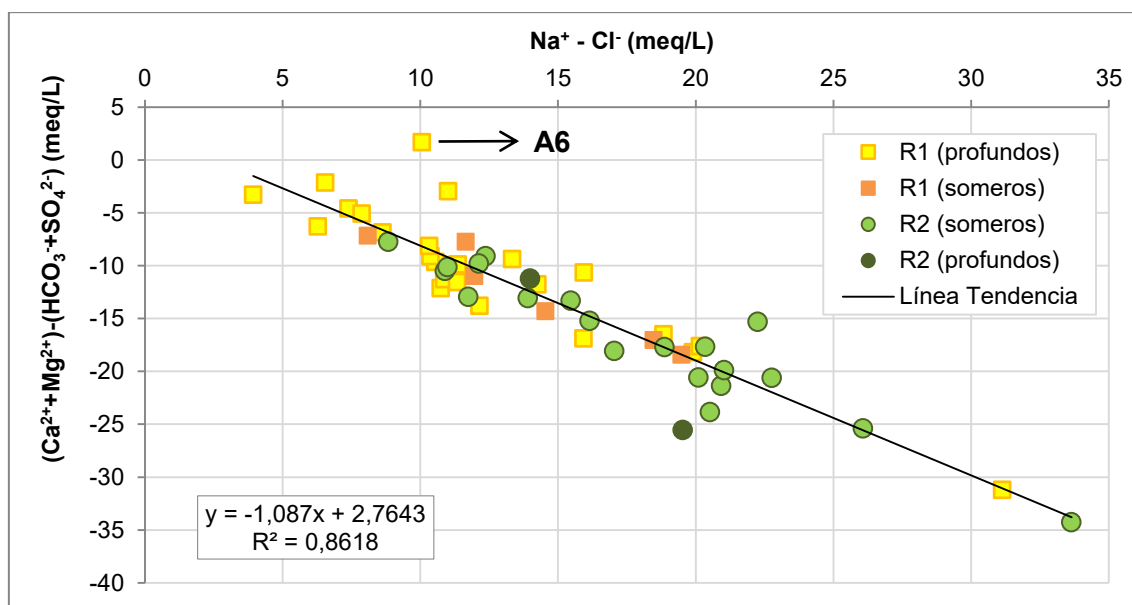


Figura 109. Diferencia entre cationes y aniones principales en las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.

Finalmente, de acuerdo a las relaciones iónicas realizadas, se define que los procesos modificadores de la química del agua subterránea son, en primero lugar la disolución de carbonatos (calcita y dolomita) y yeso, que posteriormente sufre un proceso de remoción de calcio de la solución (validado por las relaciones $\text{r}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{r}(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$, $\text{rCa}^{2+}/\text{rSO}_4^{2-}$, y $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ y $\text{rMg}^{2+}/\text{r}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$) a partir de un segundo proceso denominado intercambio catiónico (apoyado por la relación $(\text{rMg}^{2+} + \text{rCa}^{2+}) - (\text{rHCO}_3^- + \text{rSO}_4^{2-}) / (\text{rNa}^+ - \text{Cl}^-)$),

por el que se genera la adsorción de calcio en la fase sólida y liberación o desorción de sodio a la solución, lo que generaría un exceso de sodio (validado por la relación rNa^+/rCl^-). A su vez, algunas relaciones indicarían que la remoción de calcio podría suceder por precipitación de calcita, la cual depende de los índices de saturación que presente. Se descarta la hidrólisis de albita como fuente de sodio dado los resultados obtenidos por la relación $SiO_2/(Na^++K^+-Cl^-)$, pero sí puede estar ocurriendo meteorización de algún silicato ya que en la relación HCO_3^-/SiO_2 un 50% de las muestras no se pudo confirmar la dominancia de ningún proceso (disolución de carbonatos o hidrólisis de silicatos). Con el objetivo de apoyar estos procesos se presentan los diagramas de campos de estabilidad de algunos silicatos y los índices de saturación en los siguientes apartados.

10.2.9 Diagramas de campos de estabilidad

Con el propósito de conocer los minerales que se encuentran en equilibrio con la solución dentro del acuífero, se utilizaron los denominados diagramas de estabilidad, empleados por Tardy (1971) a partir de métodos termodinámicos, generando los diagramas de gibsita, caolinita, montmorillonita y feldespato que habían sido definidos por otros autores previamente (Garrels, 1960; Garrels y Christ, 1965; entre otros). Los diagramas están conformados por la concentración de sílice en el eje de las abscisas y la relación entre las actividades de los cationes principales respecto al hidrógeno en el eje de las ordenadas.

Se representaron en los diagramas un número de 38 muestras, teniendo en cuenta que no se realizaron determinaciones de sílice en todas las muestras del área de estudio. Teniendo en cuenta minerales con sodio en su composición, se observa en el diagrama de la Figura 110 que el agua subterránea en la totalidad de las muestras se encuentra en equilibrio con la montmorillonita sódica. Mientras que, teniendo en cuenta el catión calcio en la Figura 111, la mayoría de las muestras se encuentran en equilibrio con la montmorillonita cálcica, exceptuando dos que presentaron un contenido de sílice levemente menor que el resto (B7 y D8) y se encuentran equilibradas con la caolinita. Por otro lado, respecto al catión potasio, en la Figura 112 se observa que un 58% de las muestras se encuentra en equilibrio con feldespato potásico y un 42% se encuentra en equilibrio con caolinita.

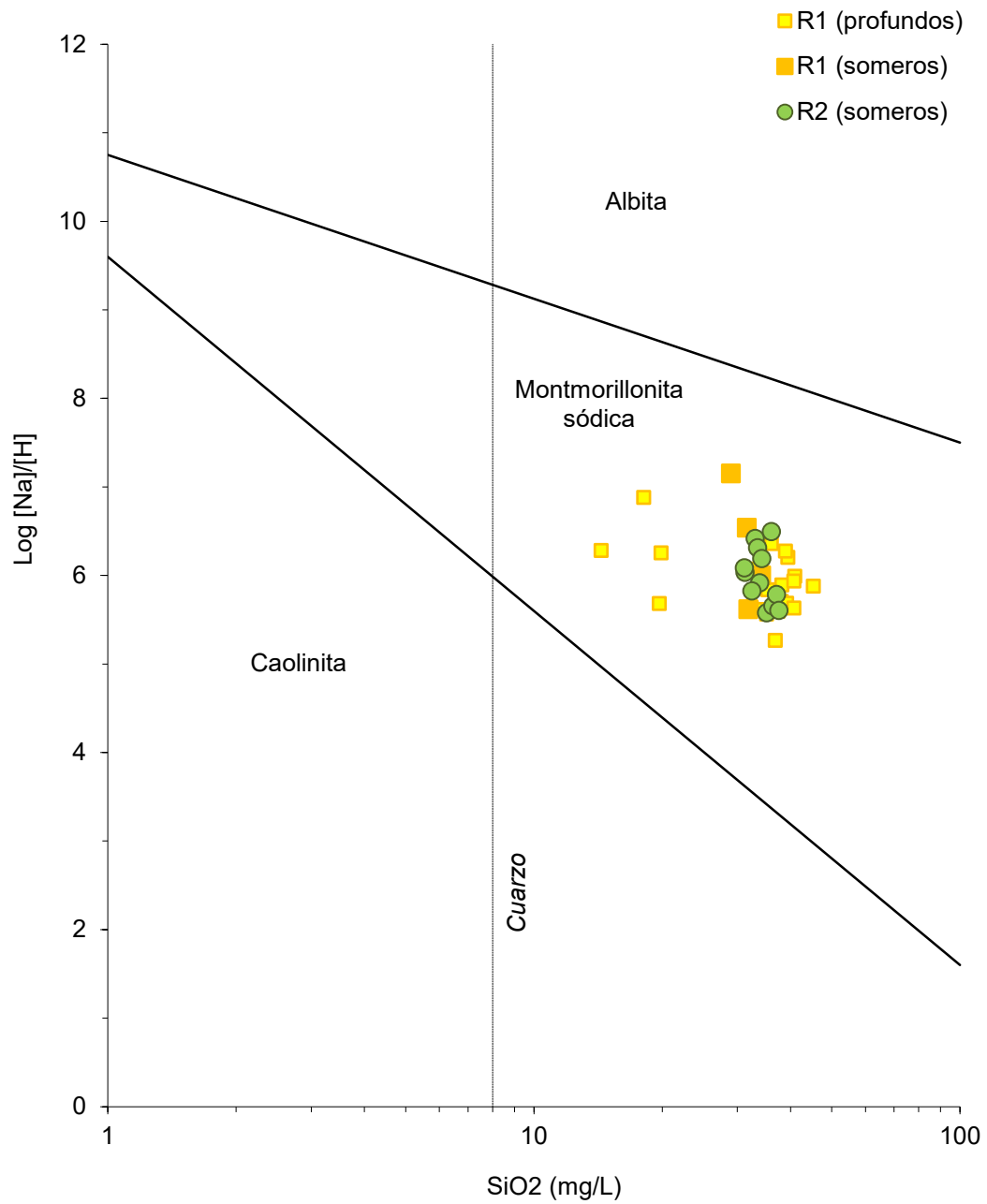


Figura 110. Diagrama de Estabilidad del agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo, con distintas fases minerales en relación con la actividad del ion sodio.

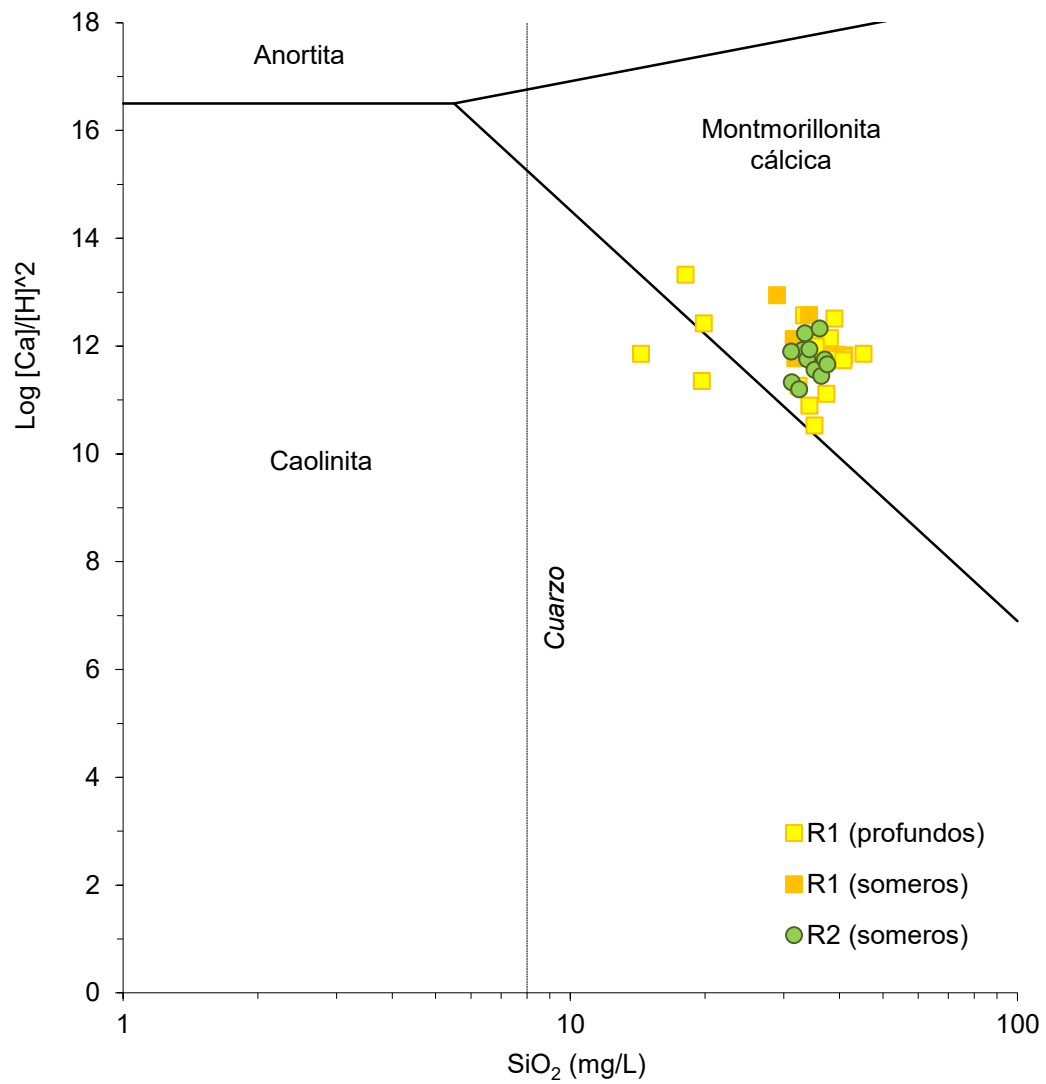


Figura 111. Diagrama de Estabilidad del agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo, con distintas fases minerales en relación con la actividad del ion calcio.

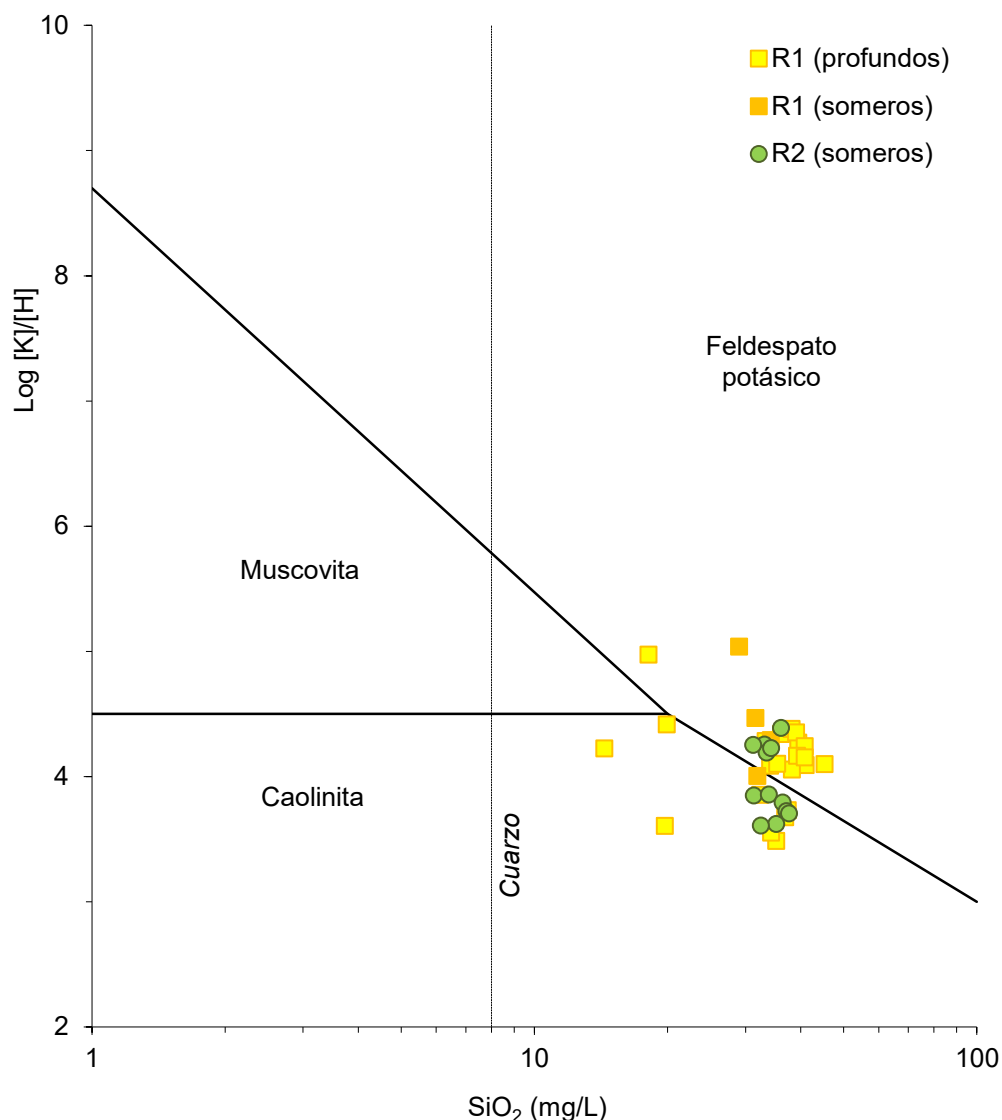


Figura 112. Diagrama de Estabilidad del agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo, con distintas fases minerales en relación con la actividad del ion potasio.

Cabe destacar entonces que el agua subterránea se encuentra en equilibrio con minerales arcillosos del grupo de los feldespatos potásicos, caolinitas y montmorillonitas sódicas y cálcicas. El grupo de las caolinitas y montmorillonitas pueden provenir de la hidrólisis de feldespatos y, considerando que un 50% de las muestras en la relación $\text{HCO}_3/\text{SiO}_2$ presentó valores que no permitían confirmar procesos ni de disolución de carbonatos y ni de hidrólisis de silicatos, no se descarta la posibilidad de que dicho proceso ocurra. Los sedimentos del área de estudio y alrededores (Apartado 4.2.2.3 en el capítulo 4 de Geología) han presentado un importante contenido de montmorillonita y, en menor concentración, de caolinita como también cantidades de feldespatos, principalmente de andesina. En conjunto con lo planteado en el apartado anterior, estos grupos de arcillas (caolinita, montmorillonita, entre otros) se destacan como intercambiadores de iones,

verificando la posibilidad de que ocurra el proceso de intercambio catiónico en la solución.

10.2.10 Índices de Saturación

Con la utilización del programa Diagrammes se calculó la actividad de cada ion, la fuerza iónica, la presión parcial de CO_2 y los índices de saturación de cada muestra. La fuerza iónica, considerando que es una medida de la concentración total de iones de una solución, presentó un aumento a medida que asciende la salinidad, por lo tanto se observa en la Figura 113 que las muestras con mayor fuerza iónica ($I > 0,1$ mol/kg) son las de mayor concentración de SDT: B5, A6 y E1 (las primeras dos pertenecientes a pozos profundos en zona de descarga y la tercera a un pozo somero cercano a una laguna de descarga local). La fuerza iónica, si bien juega un rol secundario en la solubilidad, puede favorecerla hasta un valor límite, más allá del cual tiende a disminuir.

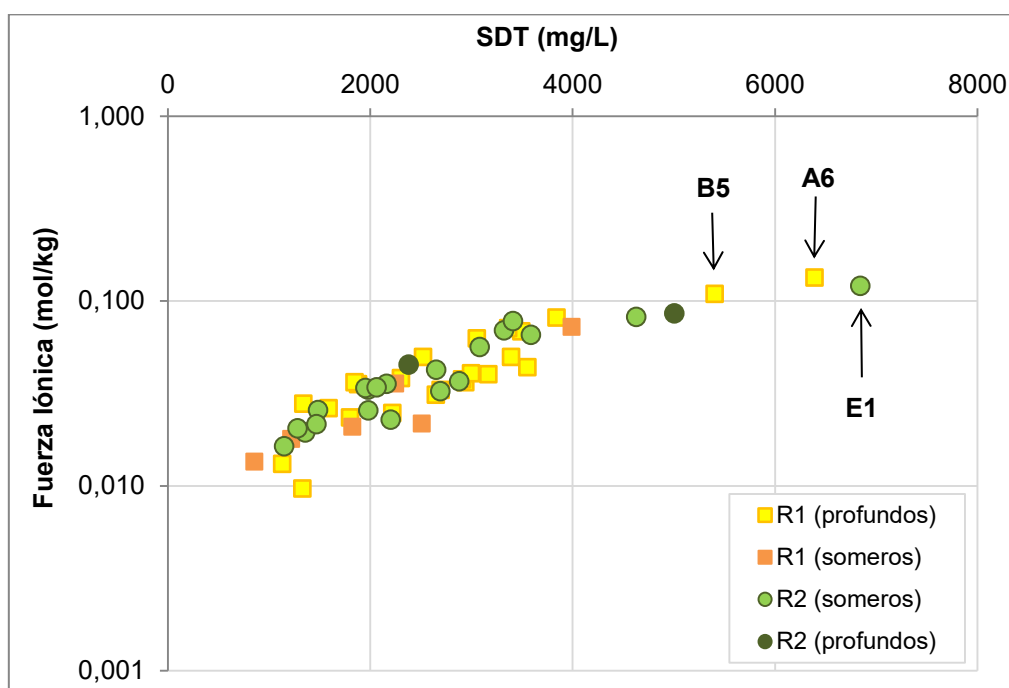


Figura 113. Fuerza iónica en relación a los SDT para las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.

Durante el proceso de infiltración el agua disuelve CO_2 hasta alcanzar valores de presión parcial de entre $10^{-2,6}$ y $10^{-2,1}$ atm en la parte superior de la zona saturada. Esta disolución se produce a partir del gas disponible en el suelo por la respiración de las raíces de las plantas y la oxidación de la materia orgánica (Appelo y Postma, 1993). Una parte reacciona con el agua obteniendo ácido carbónico que se disocia parcialmente en iones carbonato y bicarbonato. Esto implica una acidificación del agua que incrementa su reactividad frente a distintas especies carbonatadas y silicatadas. La disolución de CaCO_3 aumenta cuando se incrementa la presión parcial de dióxido de carbono (pCO_2) y

disminuye el pH. Ambos comportamientos son concomitantes ya que el CO_2 es la principal fuente de acidez en el agua. Es por ello que conocer la $p\text{CO}_2$ del agua resulta relevante para determinar su comportamiento frente a minerales carbonáticos (Freeze y Cherry, 1979). La presión parcial del CO_2 en el área de estudio varió entre -3,01 y -1,32 ($\log\text{CO}_2$ atm) y en la Figura 114 se observa, en general, una disminución de esta presión parcial al aumentar el pH en las muestras de agua subterránea y viceversa, por lo que habría un número de muestras que se encontrarían en condiciones de disolver CaCO_3 .

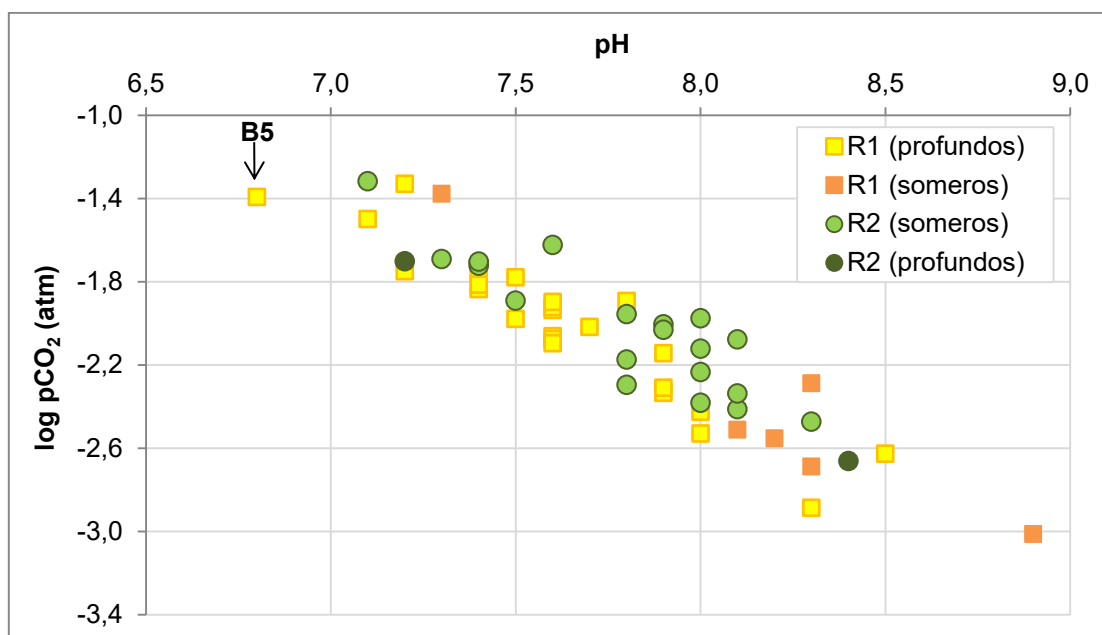


Figura 114. Presión parcial de CO_2 (en log) en relación al pH de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.

Por otra parte, se determinaron los índices de saturación de calcita, dolomita y yeso, cuyos gráficos se interpretan considerando que la solución se encuentra en equilibrio con el mineral en cuestión cuando tiende a 0. Si el valor es positivo la solución se encuentra sobresaturada y tenderá a precipitar y, por el contrario, si es negativa se halla subsaturada y tenderá a disolver más fase mineral siempre que esté presente (Hounslow, 1995). Debido a las incertidumbres propias de los datos analíticos y termodinámicos, la situación de equilibrio no es considerada 0 en un sentido estricto y se sitúa en las figuras en un rango de $\pm 0,2$ (Merkel y Planer-Friedrich, 2008).

Como se observa en la Figura 115, un 60% de las muestras se encuentran sobresaturadas en calcita, por lo que tiende a precipitar. Si esto ocurriera se podría sostener la posibilidad de remoción de calcio de la solución por precipitación de CaCO_3 . Un 40% del total de muestras se encuentra en equilibrio y sólo tres muestras se encuentran subsaturadas en calcita (B5, CO06 y C7), por lo que podría disolver dicho mineral. Con respecto al mineral carbonático dolomita (Figura 116), casi la totalidad de las muestras se encuentran sobresaturadas (96%), sólo 2 muestras se presentan en equilibrio y

una muestra, B5, se encuentra subsaturada con tendencia a disolver. Si bien la dolomita es el mineral carbonático más abundante después de la calcita, no precipita fácilmente por razones cinéticas, por lo que el hecho de encontrarse sobresaturada no indica que pueda precipitar. Por último, las muestras se encuentran en su totalidad subsaturadas en yeso (Figura 117), por lo que presentan una tendencia a disolver dicho mineral. Específicamente, la muestra B5, se encuentra subsaturada respecto a todos minerales analizados, que siendo una de las muestras con mayor salinidad, podría deberse a su elevada fuerza iónica y a su presión parcial también elevada.

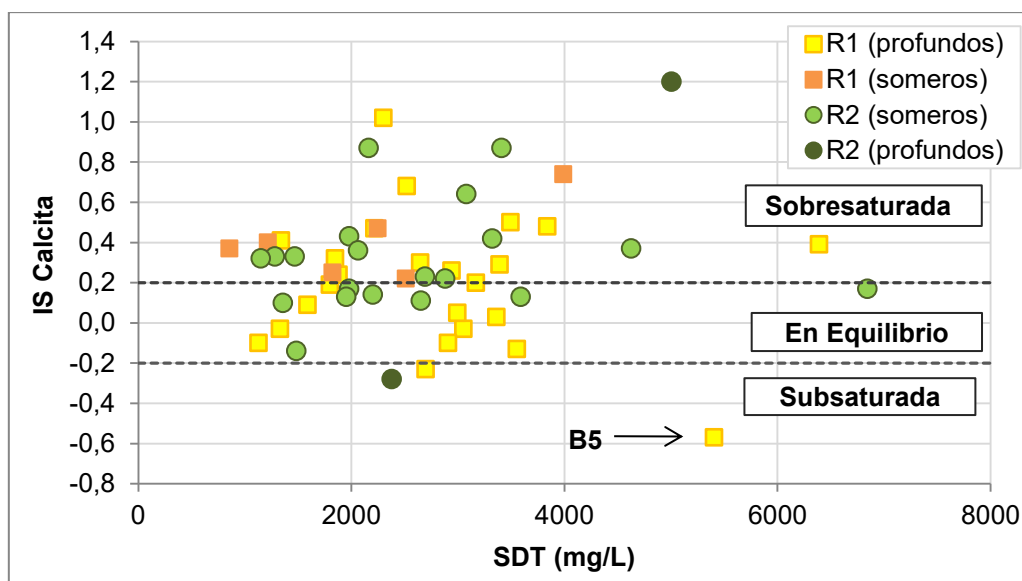


Figura 115. Índice de Saturación de calcita en relación a los SDT de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.

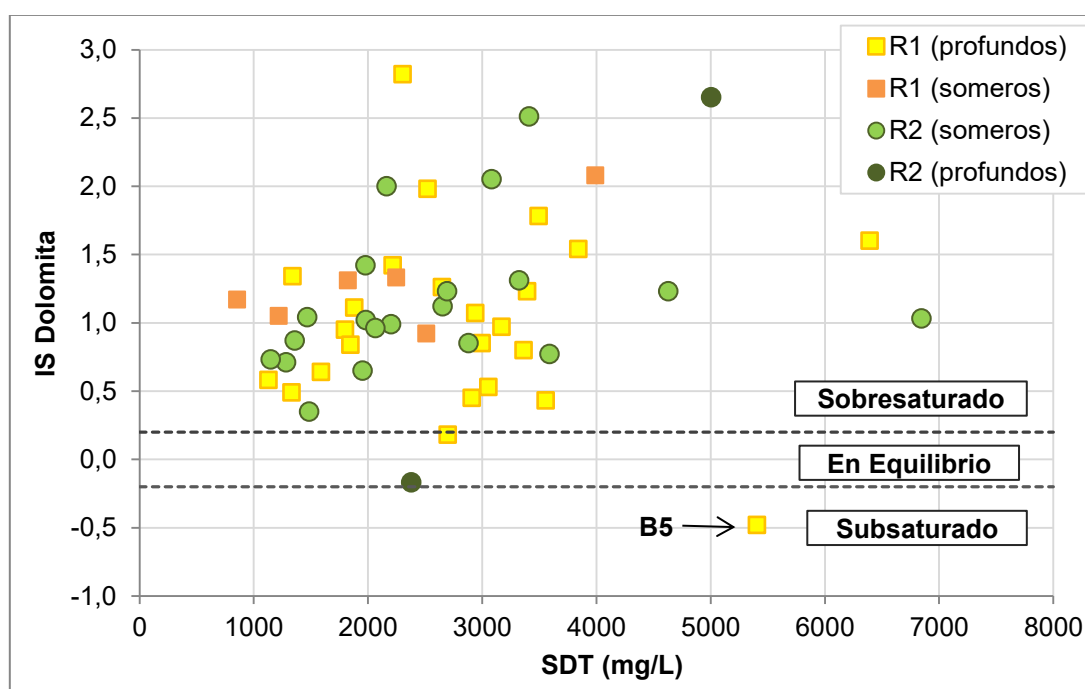


Figura 116. Índice de Saturación de dolomita en relación a los SDT de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.

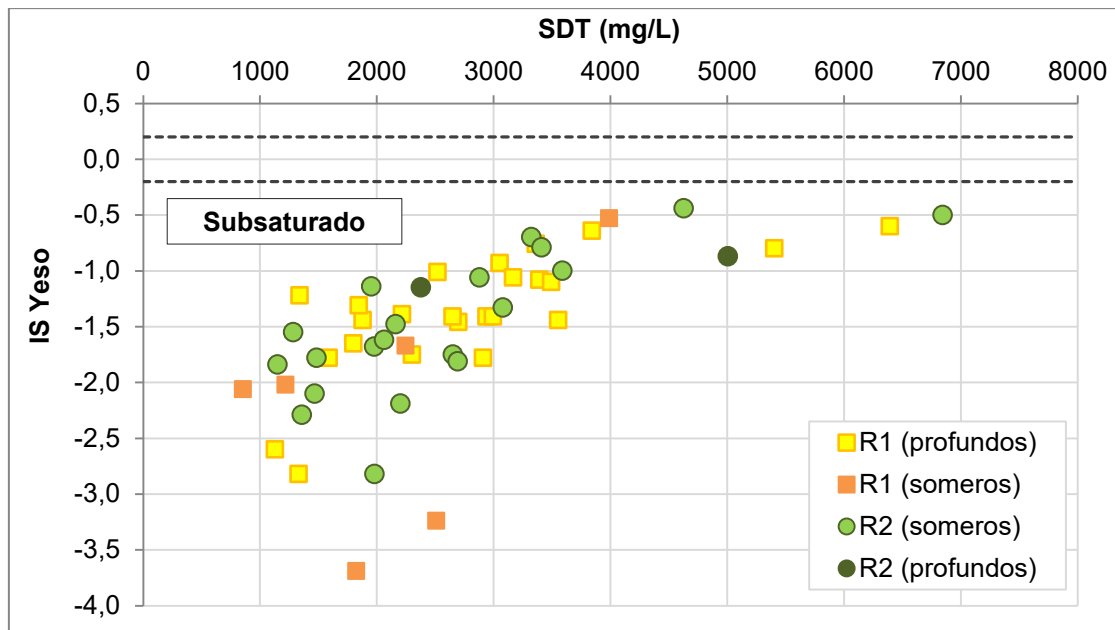


Figura 117. Índice de Saturación de yeso en relación a los SDT de las muestras de agua subterránea según región hídrica y profundidad del pozo.

Considerando los resultados de los IS y teniendo en cuenta lo obtenido por las relaciones iónicas, podría ser posible que ocurra en el agua subterránea una pérdida de calcio por la tendencia a precipitar calcita al encontrarse un gran número de muestras sobresaturadas (60%). De igual manera esta condición de sobresaturación indica que la fase sólida no se estará disolviendo, aunque no necesariamente esté precipitando, ya que pueden alcanzarse índices de sobresaturación elevados para una sustancia sin que se verifique su precipitación (Stumm y Morgan, 1981). Asimismo, se confirma la disolución de yeso en la mayoría de las muestras que, junto a la remoción de calcio de la solución por precipitación y/o intercambio catiónico, conformarían los procesos más importantes dentro del área de estudio.

11 ISOTOPIA AMBIENTAL

11.1 Introducción

Los isótopos ambientales son aquellos que se encuentran ampliamente distribuidos en el ambiente y participan dentro de los ciclos naturales. Dentro del ciclo hidrológico son, principalmente los isótopos del hidrógeno y del oxígeno, los que permiten estudiar distintos procesos dado que forman parte de la molécula de agua.

A medida que el agua circula a través de las diferentes fases del ciclo hidrológico, distintos procesos físicos y fenómenos meteorológicos actúan para generar este transporte, produciendo una determinada caracterización isotópica, la cual es utilizada para distintos estudios relacionados al origen y comportamiento del agua. Los isótopos que no sufren cambios en sus propiedades nucleares con el tiempo se denominan isótopos estables (^2H , ^{18}O , ^{13}C , ^{15}N , entre otros), mientras que aquellos que sufren transformación en otros nucleidos al transcurrir el tiempo son denominados isótopos radiactivos (^3H , ^{14}C , ^{37}Ar , ^{39}Ar , ^{234}U , entre otros) (Dapeña, 2008; Dapeña y Panarello, 2009).

Dentro de las investigaciones que permite la isotopía en el ciclo hidrológico, se puede incluir aquellas relacionadas con el origen y zona de recarga, los mecanismos de salinización, los procesos que tienen lugar en la zona no saturada (ZNS), así como la interpretación de fenómenos termales y la determinación de términos del balance hídrico. Además permiten distinguir aguas con una composición química similar, ya que son trazadores ideales dado su carácter conservativo, es decir que no reaccionan como otros elementos disueltos en el agua (Dickinson *et al.*, 2006). Mediante el uso del tritio y el ^{14}C se puede introducir la variable temporal permitiendo, en casos favorables, la evaluación de tiempos de residencia del agua en reservorios subterráneos y la velocidad del flujo (Dapeña, 2008; Dapeña y Panarello, 2009).

Considerando que las precipitaciones son la principal función de entrada en los sistemas hídricos, es importante contar con un registro de su composición isotópica. En Argentina, incluyendo la provincia de La Pampa, se cuenta con este registro dado que participa de la Red Colectora de Isótopos en Precipitación (GNIP) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), a través del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS) y el Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCYC). Los objetivos principales de esta red son la evaluación, a escala global, de la distribución espacial y temporal de los contenidos de estos isótopos en las precipitaciones y su dependencia de los parámetros meteorológicos.

La molécula de agua está formada por los elementos hidrógeno y oxígeno. El primero se presenta en la naturaleza bajo la forma de dos isótopos estables, el protio (^1H) y el deuterio (^2H), y uno radiactivo, el tritio (^3H). El hidrógeno natural está formado por la mezcla de los isótopos estables protio ^1H y deuterio ^2H , cuyas abundancias promedio son: ^1H : 99,9844% y ^2H 0,0156% (Way *et al.*, 1950). El elemento oxígeno posee tres isótopos estables: ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O y el oxígeno natural es una mezcla de los tres isótopos estables, cuyas abundancias promedio son: ^{16}O : 99,759%, ^{17}O : 0,0374% y ^{18}O : 0,2039%. Si se consideran los isótopos estables del oxígeno y los del hidrógeno existen cinco tipos de agua con diferente peso molecular y nueve posibles composiciones isotópicas. De estas combinaciones en hidrología las más comunes en la naturaleza son tres $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ y $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$.

Esta sustitución de isótopos dentro de la molécula de agua genera variaciones en propiedades relacionadas a la masa molecular como la densidad, presión de vapor, entre otras, que a su vez dan lugar a un fraccionamiento isotópico durante los procesos físicos que ocurren durante el transporte del agua en las distintas fases del ciclo hidrológico, produciendo así una caracterización isotópica determinada. Por ejemplo, durante el proceso de evaporación se puede generar una concentración de sales que se puede confirmar midiendo la composición isotópica y obteniendo una alineación en un recta de evaporación con los valores de ^2H y ^{18}O (Dapeña, 2008).

Los resultados obtenidos con esta metodología se expresan en desviación isotópica (δ), la cual se define como la diferencia relativa en la relación entre el isótopo pesado (generalmente el menos abundante) respecto al isótopo liviano (generalmente el más abundante) de la muestra, respecto a una referencia. Como las diferencias entre las muestras y la referencia son muy pequeñas se expresa en desviaciones por mil δ (‰) definidas como:

$$\delta = 1000 \times \frac{R_M - R_E}{R_E}$$

donde, δ : desviación isotópica en ‰ (partes por mil), M: muestra, E: patrón internacional Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW, Gonfiantini, 1978), R: relación isotópica ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o $^2\text{H}/^1\text{H}$).

Por definición, el valor δ (V-SMOW) es igual a 0 ‰ (Craig, 1961), por lo que un valor positivo de δ indica una mayor concentración de los isótopos pesados (^{18}O o ^2H) que el del patrón, definida como *muestra enriquecida*, mientras que un valor negativo de δ significa lo contrario y sería una *muestra empobrecida* en el isótopo menos abundante respecto al estándar.

Por otro lado, la relación isotópica (R) es el cociente entre el número de moléculas que contienen a la especie menos abundante (en general la más

pesada) y el número de moléculas que contienen a la especie más común (en general la más liviana). En el caso del ^{18}O ($R^{18}\text{O}$) y deuterio ($R^{2}\text{H}$) les corresponden las siguientes expresiones:

$$R^{18}\text{O} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de moléculas } \text{H}_2^{18}\text{O}}{\text{N}^\circ \text{ de moléculas } \text{H}_2^{16}\text{O}} = \frac{(^{18}\text{O})}{(^{16}\text{O})}$$

$$R^{2}\text{H} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de moléculas } ^1\text{H}^2\text{HO}}{\text{N}^\circ \text{ de moléculas } ^1\text{H}^1\text{HO}} = \frac{(^2\text{H})}{(^1\text{H})}$$

11.2 Composición isotópica de las precipitaciones

Las primeras investigaciones realizadas en aguas de lluvia del mundo (Friedman, 1953; Dansgaard, 1964; entre otros) muestran una clara correlación entre los isótopos del oxígeno e hidrógeno así como la dependencia del fraccionamiento con la temperatura media anual del aire, que a su vez es función de la latitud y altitud geográfica. También determinaron la relación con la cantidad de precipitación y la penetración de los frentes de humedad dentro del continente, denominando estas variaciones como efectos de altitud, latitud y continentalidad. Desde la publicación de los primeros datos isotópicos en aguas naturales, se pudo definir una clara correlación entre la composición isotópica del hidrógeno y del oxígeno en las precipitaciones (no afectadas por evaporación) de todo el mundo, generando una relación lineal, actualmente conocida como recta meteórica global fijada por Craig (1961) que responde a la siguiente ecuación: $\delta^{2}\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$ (Figura 118). Este autor también observó que las aguas empobrecidas se asociaban principalmente a zonas frías y, por el contrario, las enriquecidas a zonas cálidas.

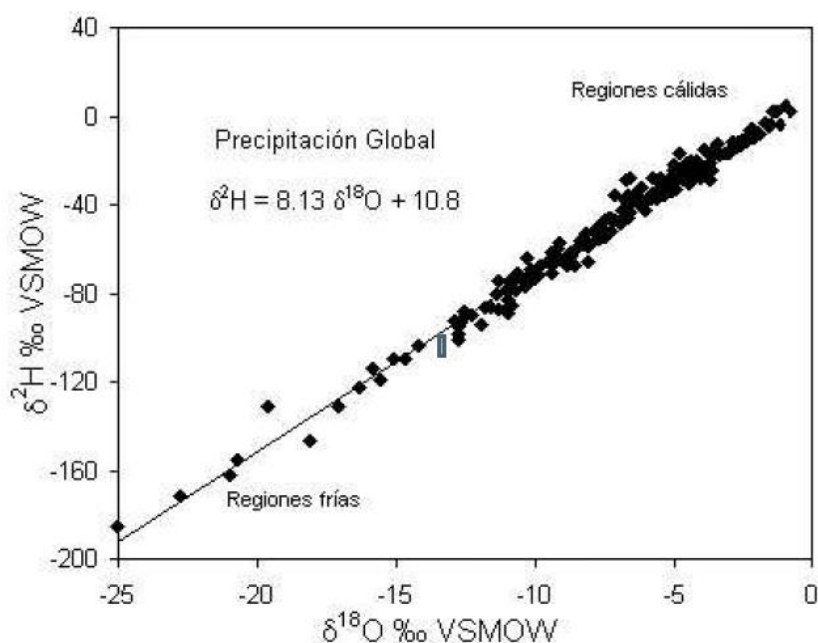


Figura 118. Recta meteórica global (Craig, 1961).

Dansgaard (1964) utilizó esta correlación lineal para relacionar la composición isotópica de cualquier muestra de agua con la línea de aguas meteóricas y definió el parámetro conocido como exceso de deuterio “d”, definido con la siguiente ecuación:

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

Donde “d” es la ordenada al origen, parámetro inherente al vapor original y es la propiedad más útil para caracterizar el origen del mismo; éste, además permite diferenciar cuan apartados del equilibrio isotópico fueron los procesos de evaporación. En la mayoría de las precipitaciones continentales “d” = + 10‰. El exceso de deuterio depende del valor de humedad relativa, en consecuencia un valor alto de “d” está asociado con bajos contenido de humedad y viceversa.

Por otro lado, Gonfiantini (1999) confirmó que en cualquier lugar la composición isotópica del hidrógeno y oxígeno en precipitaciones obedece a la relación lineal del tipo:

$$\delta^2\text{H} = a \delta^{18}\text{O} + d$$

Dónde: *a* varía de 6,5 a 8 y *d* varía de 0 a 30, dependiendo el origen e historia que tuviera la masa de aire que originó la precipitación, estación, altitud y latitud, características climáticas, etc. Estas variaciones permiten definir rectas meteóricas locales que representen las condiciones meteorológicas del lugar y caracterizar la precipitación como función de entrada a los sistemas hídricos en distintas regiones (Dapeña y Panarello, 2009).

11.2.1 Composición isotópica local

En la provincia de la Pampa se cuenta con varias estaciones colectoras de isótopos en precipitación de las cuales sólo algunas presentan registros estables en el tiempo. Considerando que la provincia presenta una variación climática importante en sentido oeste a este, se han distribuido hasta siete estaciones colectoras de precipitación en toda el área, ubicadas en las localidades de Intendente Alvear, Quemú Quemú, Algarrobo del Águila, Padre Buodo, Puelén, Santa Rosa y Arata, de las cuales actualmente sólo siguen registrando las últimas cuatro mencionadas (Figura 119 y Tabla 25).

Tabla 25. Estaciones colectoras de precipitación de la Provincia de La Pampa.

Estaciones Colectoras	Coordenadas Geográficas	Altitud (m s.n.m.)	Período de Funcionamiento
Padre Buodo	37° 19' S - 64° 20' O	185	1997 - 2001
El Escabel	37° 26' S - 65° 12' O	307	2002 - 2002
Intendente Alvear	35° 17' S - 63° 41' O	134	2009 - 2018

Estaciones Colectoras	Coordenadas Geográficas	Altitud (m s.n.m.)	Período de Funcionamiento
Quemú Quemú	36° 3' S - 63°35'O	122	2007 - 2018
Algarrobo del Águila	36°24'S - 67°08'O	305	2005 - actualidad
Puelén	37°20'S - 67°37'O	456	2018 - actualidad
Santa Rosa	36°33'S - 64°18' O	215	2014 - actualidad
Arata	35°38' S 64°21' O	215	2018 - actualidad

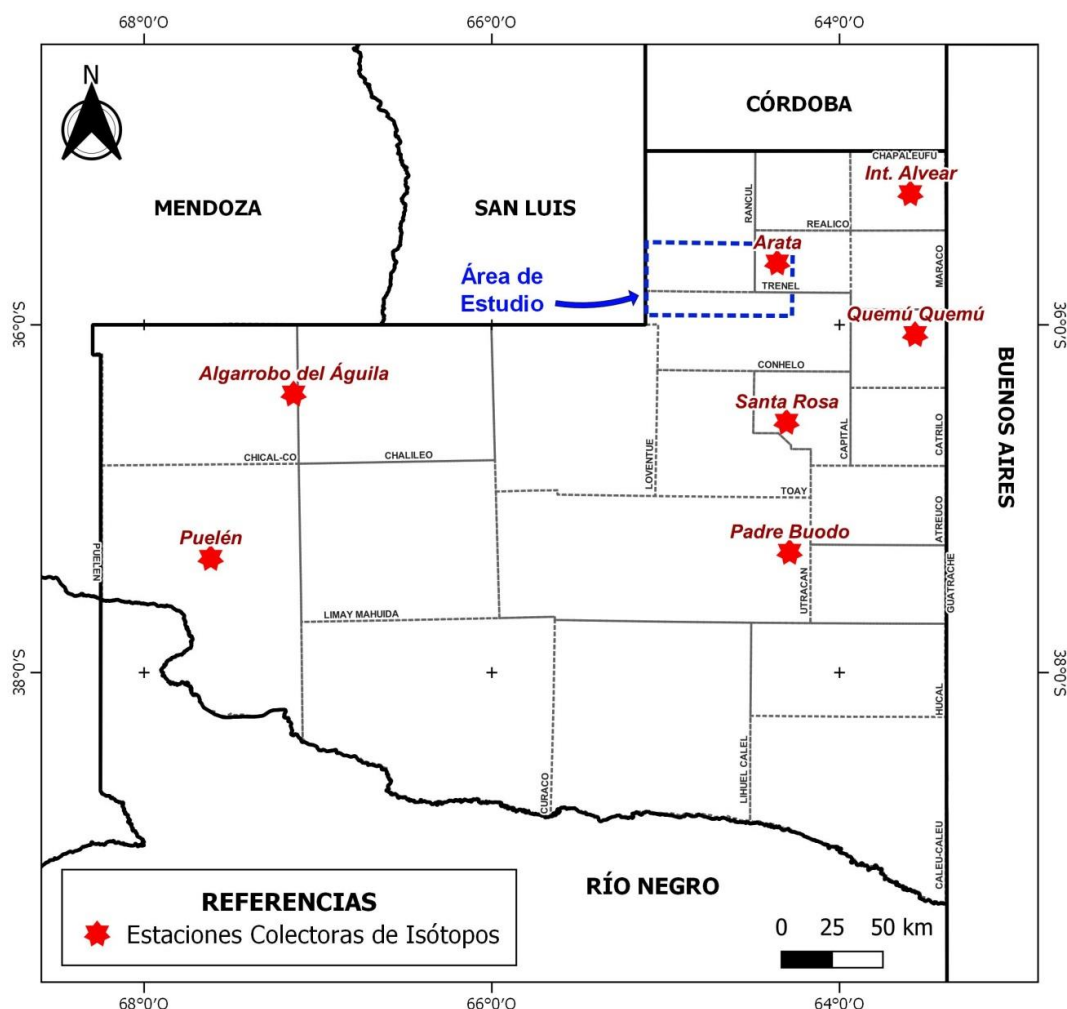


Figura 119. Ubicación de las estaciones colectoras de precipitación para isótopos en la Provincia de La Pampa.

En el caso de la estación Padre Buodo, con sólo 4 años de registro se obtuvo una recta meteórica local (LAML) que responde a $\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10\text{‰}$, coincidente con los parámetros de la recta meteórica mundial (Dapeña *et al.*, 2002). El registro de la estación El Escabel fue errático y sólo se colectaron unas pocas muestras derivando en el cierre de la estación. Respecto a la estación Algarrobo del Águila su registro es parcial debido a las características climáticas de la zona y hasta la fecha la información no es suficiente para elaborar una recta meteórica local. El registro de las estaciones de Quemú Quemú e Intendente Alvear fue parcial debido a diversos problemas logísticos y

operativos, como rotura de los colectores, no colección de la muestra, lluvias extraordinarias que desbordaron el recipiente, entre otros, por lo que Ceballo (2020), teniendo en cuenta la cercanía de ambas estaciones, elaboró una recta meteórica de carácter regional con la información de ambas estaciones (Figura 120). Por su parte, la estación colectora de la localidad de Puelén, es reciente y fue establecida por la Administración Provincial del Agua con el objetivo de estudiar los manantiales de la zona. Considerando la escasez de precipitaciones en la zona, la cantidad de muestras aún no es suficiente para efectuar una recta meteórica local.

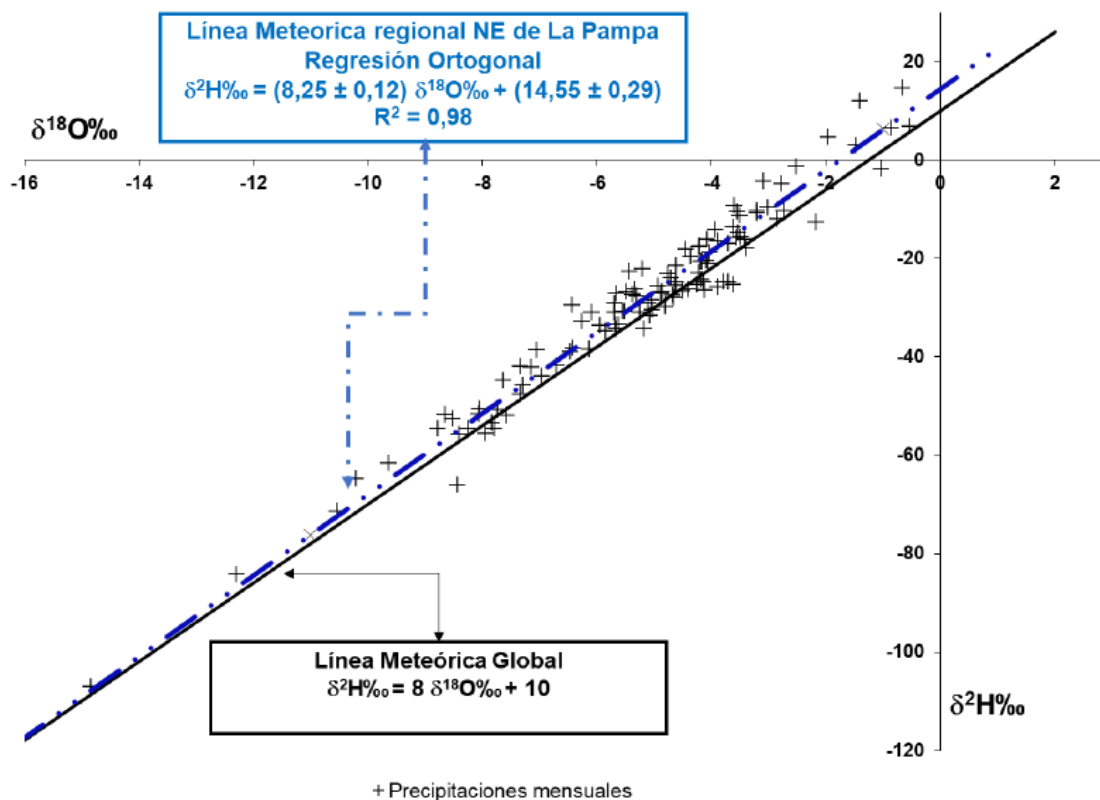


Figura 120. $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ recta meteórica global y recta meteórica regional para el NE de La Pampa y precipitaciones mensuales de las estaciones de Quemú Quemú e Intendente Alvear. Extraído de Ceballo (2020).

Se efectuaron dos líneas meteóricas locales con los datos de isótopos estables de las estaciones colectoras de agua de lluvia de la localidad de Arata y de Santa Rosa (Tablas IX y X del Anexo). La primera comenzó a registrar datos en el año 2018 para este trabajo, a partir de un convenio entre la Cooperativa de Servicios Públicos de Arata, la Municipalidad de Arata y la Universidad Nacional de La Pampa. El registro ha sido continuo hasta la actualidad, contando con datos hasta el mes de septiembre de 2022 que fueron analizados por el Laboratorio de Hidrología Isotópica del Grupo Hidrogeología del Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCYC) de Mar del Plata. La segunda estación, ubicada en la localidad de Santa Rosa, se encuentra dentro del predio del campus universitario de la Facultad de Ciencias Exactas y

Naturales y su registro comienza en el año 2014 hasta la actualidad. Hasta el año 2017 los análisis fueron realizados por el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS) y a partir de ese año hasta la actualidad los análisis fueron realizados por el Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCYC), ambos institutos operando dentro del marco del Proyecto de la Red Mundial de Isótopos en Precipitación (GNIP) dirigido por la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA).

La composición isotópica de la estación de Santa Rosa, que registra valores del período 2014-2022, muestra una dispersión importante en las muestras correspondientes a los meses de los distintos años registrados, obteniendo en $\delta^{18}\text{O}$ un valor mínimo de $-12,4\text{‰}$ y un máximo de $+1,6\text{‰}$, y en $\delta^2\text{H}$ osciló entre un mínimo de $-94,6\text{‰}$ y un máximo de $+13,9\text{‰}$. Por su parte la estación de Arata registro valores de $\delta^{18}\text{O}$ que variaron entre un mínimo y un máximo de -10‰ y $2,3\text{‰}$ respectivamente, y los registros de $\delta^2\text{H}$ oscilaron entre $-69,9\text{‰}$ y 18‰ . Estas variaciones son características en las rectas meteóricas y presentan una dependencia directa con los parámetros meteorológicos (Dansgaard, 1964; Rozanski *et al.*, 1993). En ninguna de las dos localidades se cuenta con registros de temperatura continuos como para confirmar una dependencia de los valores a los cambio de estaciones, pudiendo estar más empobrecidas en otoño-invierno y más enriquecidas en primavera-verano. Mientras tanto, los valores registrados y la cantidad de precipitación no permiten establecer una correlación, como se observa en las Figura 121 y Figura 122. El análisis isotópico de las muestras de ambas estaciones está realizado sobre una muestra que contempla toda la precipitación de un mes, por lo que podría enmascarar la relación entre los eventos de grandes precipitaciones asociado a eventos convectivos.

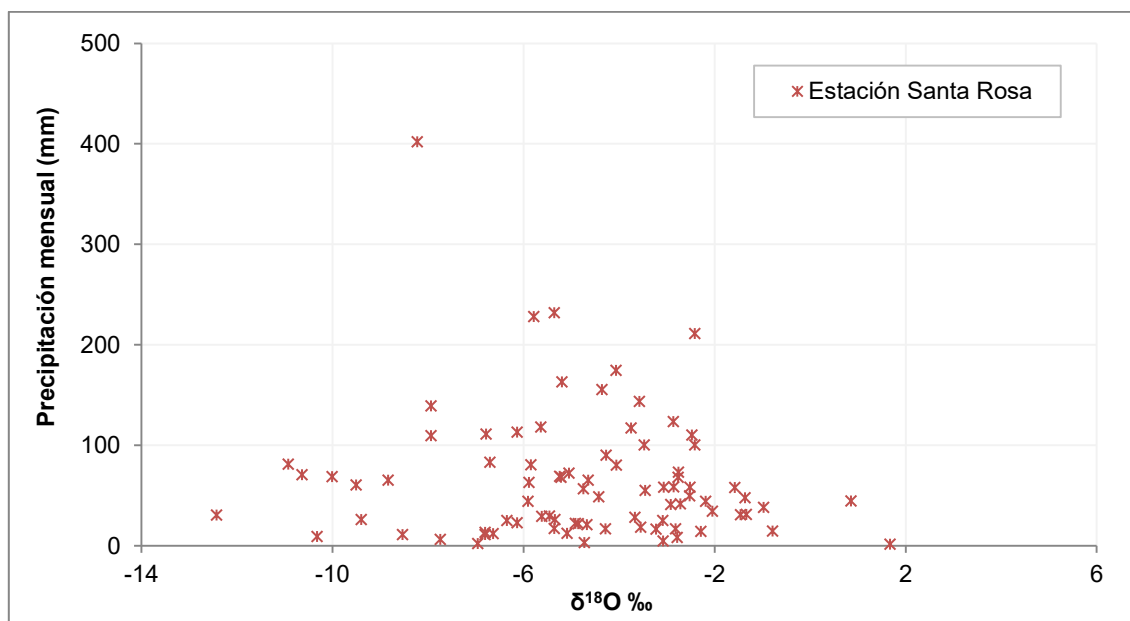


Figura 121. Cantidad de precipitación (mm) vs $\delta^{18}\text{O}$ (‰) de la Estación Santa Rosa.

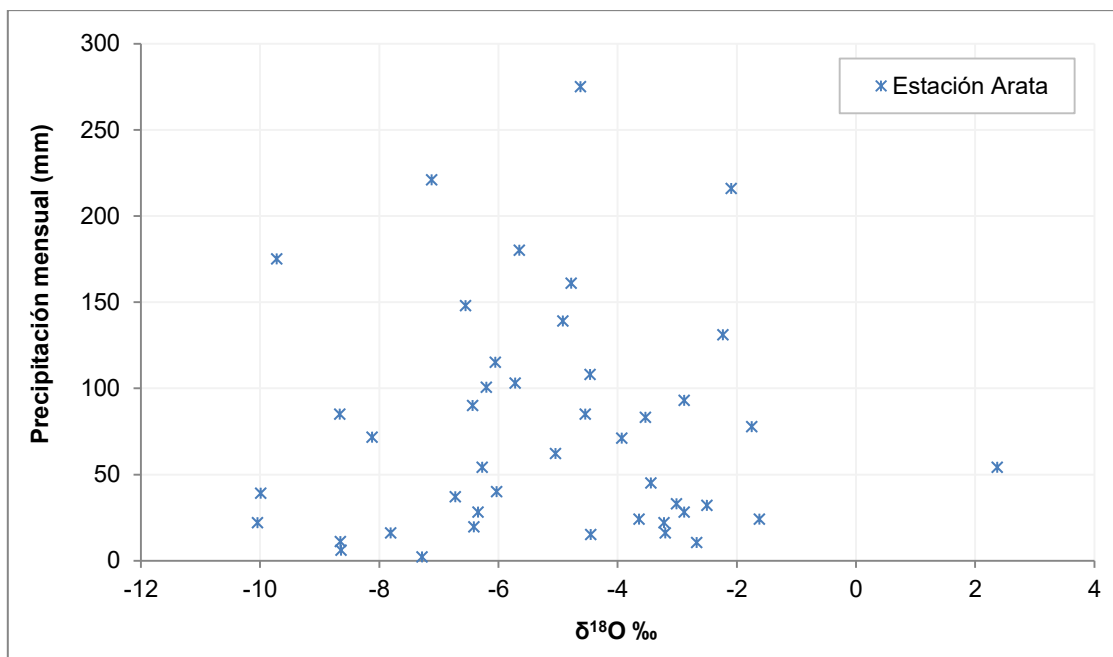


Figura 122. Cantidad de precipitación (mm) vs $\delta^{18}\text{O}$ (‰) de la Estación Arata.

Se efectuaron los promedios ponderados de los años que involucra cada estación dado que hay algunos que se encuentran incompletos por distintas causas (no hubo muestra, no precipitó, se evaporó, etc.) (Tabla 26 y Tabla 27). Por otro lado, las variaciones observadas en términos de los valores anuales ponderados se asocian a los ciclos climáticos típicos de la Llanura Chacopampeana ya definidos por Ameghino a fines del siglo XIX (Ameghino, 1884). También se calculó la media aritmética de todo el periodo, obteniendo para la Estación de Santa Rosa un valor de $\delta^{18}\text{O}$ -4,8 ‰, de $\delta^2\text{H}$ -25,7 ‰, y de exceso de deuterio d 13 ‰, mientras que la Estación de Arata presentó un valor medio de $\delta^{18}\text{O}$ -5,2 ‰, de $\delta^2\text{H}$ -27,1 ‰, y de excesos de deuterio d 14 ‰.

Tabla 26. Promedios ponderados de los registros de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de la precipitación mensual de la Estación Santa Rosa.

Año	Promedio Ponderado			Meses medidos
	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	d ‰	
2014	-5,3	-2,9	18	5
2015	-23,3	-4,5	13	10
2016	-29,0	-5,3	13	10
2017	-40,1	-6,7	14	12
2018	-21,5	-4,1	12	12
2019	-32,1	-5,4	11	11
2020	-15,5	-3,7	14	6
2021	-12,5	-2,9	11	9
2022	-34,7	-6,4	17	8

Tabla 27. Promedios ponderados de los registros de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de la precipitación mensual de la Estación Arata.

Año	Promedio Ponderado			Meses medidos
	$\delta^2\text{H} \text{‰}$	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$	d ‰	
2018	-23,3	-4,9	16	10
2019	-33,8	-5,9	14	10
2020	-18,2	-3,9	13	8
2021	-24,2	-5,3	18	10
2022	-26,1	-5,0	14	6

En las Figura 123 y Figura 124 se observan las líneas meteóricas locales de cada estación en conjunto con la línea meteórica global y los valores ponderados de cada año. Los valores de la pendiente y ordenada al origen de cada una de las regresiones lineales se irán ajustando y modificando a medida que se aumente el número de registro de precipitaciones y composición isotópica.

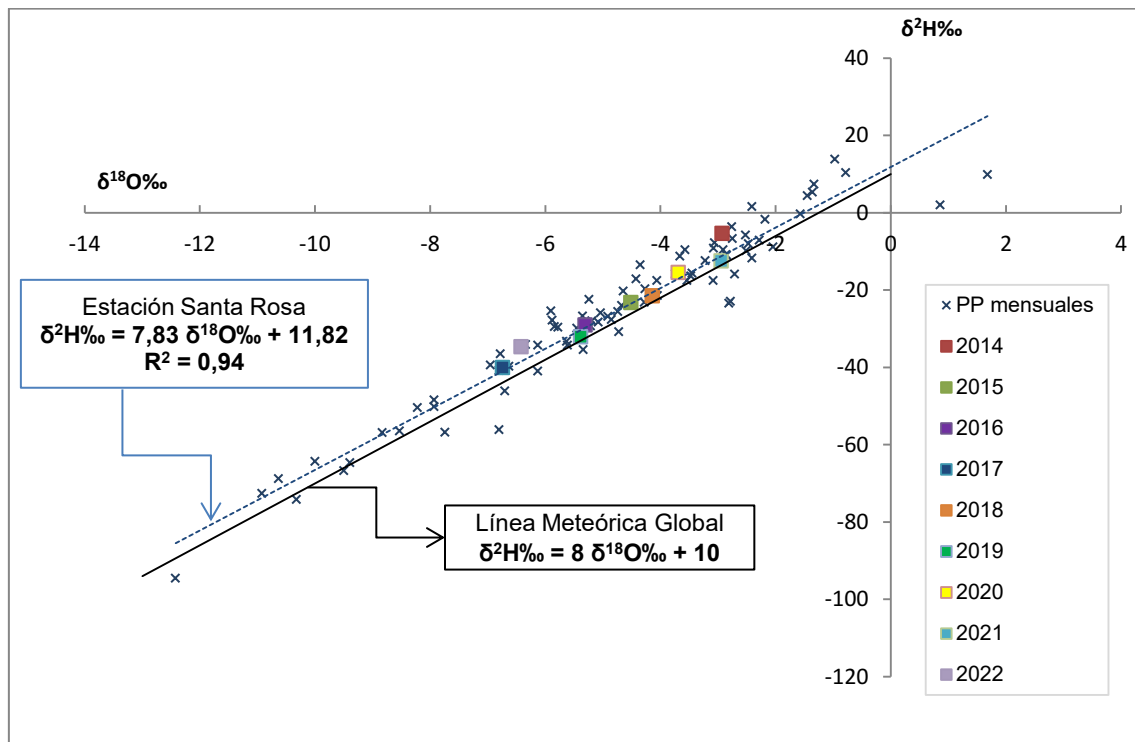


Figura 123. Relación $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, recta meteórica global, recta meteórica local, y promedios anuales ponderados de la Estación Santa Rosa para el período 2014-2022.

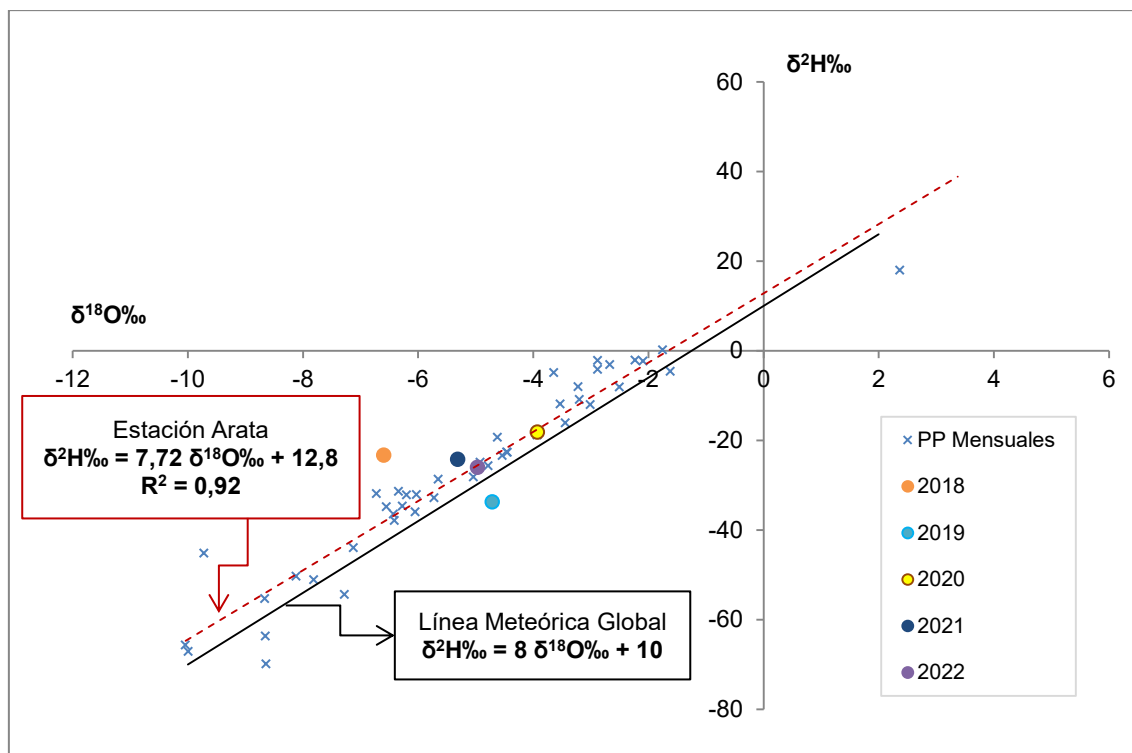


Figura 124. Relación $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, recta meteórica global, recta meteórica local, y promedios anuales ponderados de la Estación Arata para el período 2018-2022.

Teniendo en cuenta que ambas estaciones se encuentran cercanas y presentan precipitaciones medias anuales similares, se optó por utilizar todos los registros realizados en ambas estaciones con el objetivo de complementar los mismos y establecer un marco de referencia más definido en el área de estudio. Esta recta será una herramienta para la interpretación de la composición isotópica del agua subterránea de la zona analizada. De esta manera se ha calculado la *recta meteórica regional*, de carácter orientativo, representada en las Figura 125 y Figura 126, teniendo como referencia las rectas meteóricas de Arata, Santa Rosa y la global.

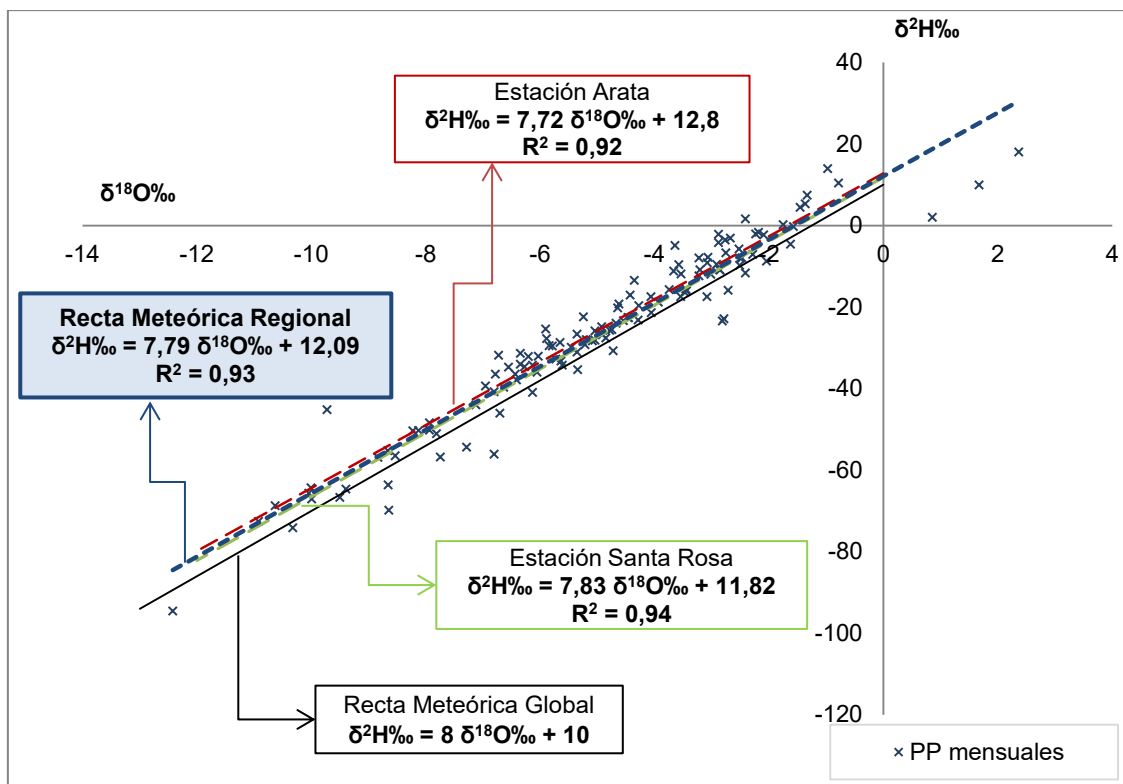


Figura 125. Recta Meteorica Regional realizada para el área de estudio, con las rectas de las estaciones de Arata y Santa Rosa y la recta meteorica global.

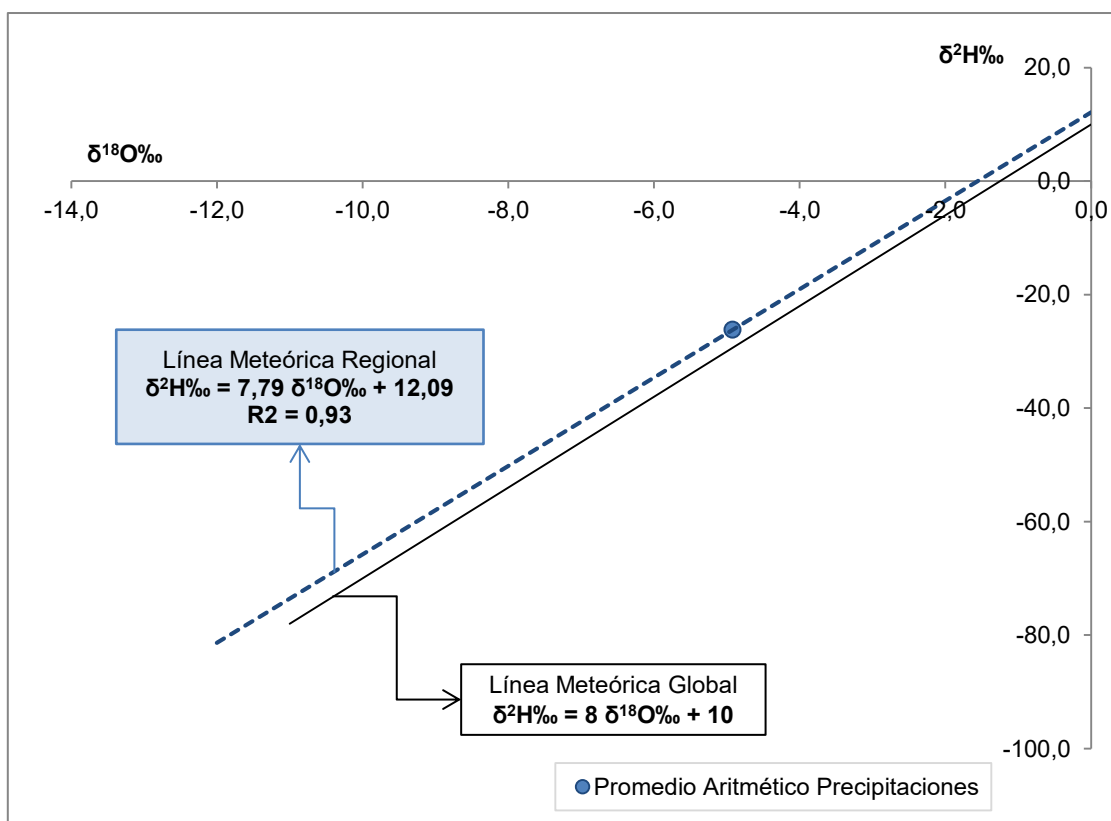


Figura 126. Recta Meteorica Regional realizada para el área de estudio y la recta meteorica global de referencia.

11.3 Composición isotópica del agua subterránea

Para efectuar el estudio isotópico del agua subterránea del área de trabajo se extrajo en las campañas de campo un total de 30 muestras destinadas al análisis de su composición isotópica. Fueron analizadas por el Grupo de Estudios Ambientales (GEA) del Instituto de Matemática Aplicada de San Luis, determinando la composición isotópica de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. En la Figura 127 se muestra la ubicación de las muestras analizadas para isótopos dentro del área de estudio, teniendo como referencias el total de muestras extraídas y la profundidad del nivel piezométrico, y en la Tabla 28 se detalla la composición isotópica obtenida.

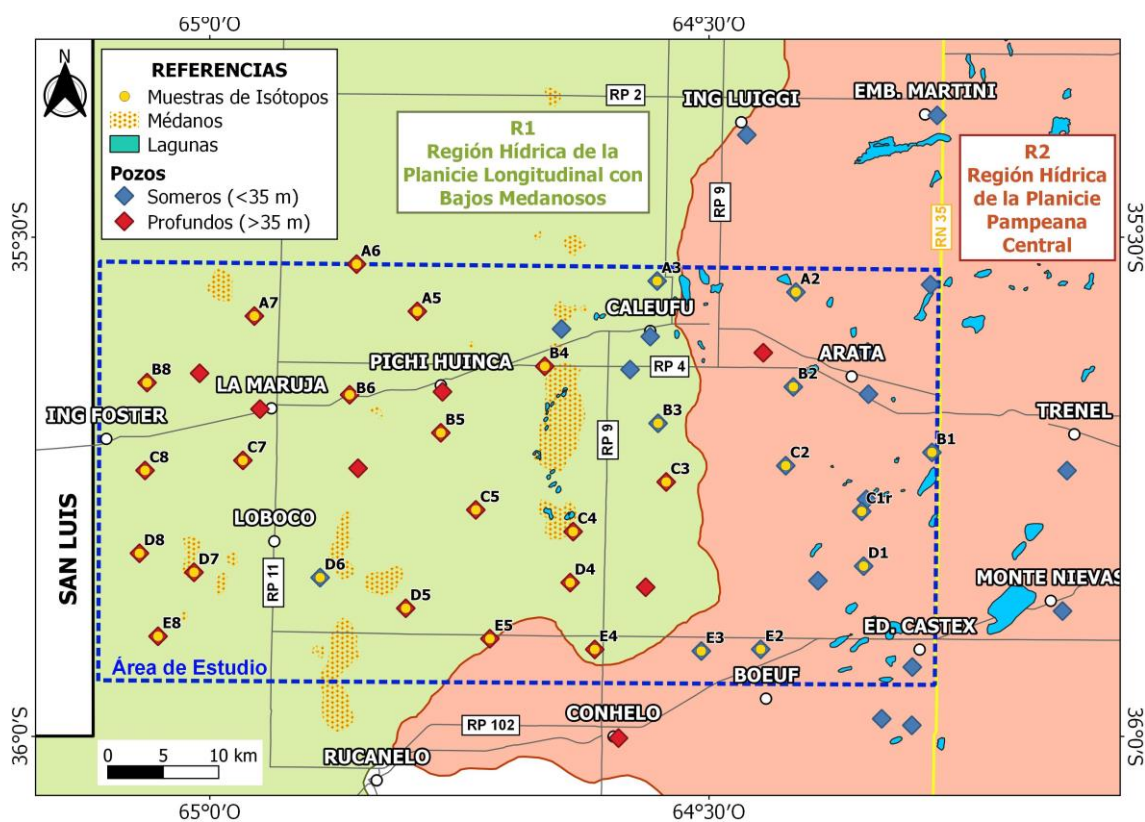


Figura 127. Ubicación de las muestras extraídas de agua subterránea para la determinación de su composición isotópica.

Tabla 28. Composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ ‰, $\delta^2\text{H}$ ‰ y d ‰) de las muestras de agua subterránea del área de estudio.

Región Hídrica	Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰	d ‰
R1	A3	-5,35	-30,02	13
	A5	-4,40	-33,75	1
	A6	-5,23	-37,63	4
	A7	-4,65	-35,88	1
	B3	-4,28	-25,27	9
	B4	-5,84	-32,24	14
	B5	-5,59	-37,59	7

Región Hídrica	Muestra	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$	$\delta^2\text{H} \text{ ‰}$	d ‰
R1	B6	-5,08	-34,02	7
	B8	-5,28	-35,74	6
	C3	-5,18	-28,59	13
	C4	-4,53	-26,08	10
	C5	-5,30	-31,41	11
	C7	-5,15	-34,88	6
	C8	-6,06	-39,78	9
	D4	-5,27	-29,60	13
	D5	-5,73	-31,25	15
	D6	-5,50	-29,28	15
	D7	-5,20	-28,88	13
	D8	-5,48	-38,63	5
	E4	-5,11	-36,44	4
	E5	-5,73	-38,10	8
	E8	-5,03	-32,66	8
R2	A2	-5,42	-29,49	14
	B1	-5,63	-30,75	14
	B2	-5,20	-27,81	14
	C1r	-4,65	-27,14	10
	C2	-5,53	-31,89	12
	D1	-4,20	-25,45	8
	E2	-4,60	-26,71	10
	E3	-5,94	-32,49	15

La caracterización isotópica del agua subterránea en el área de estudio presentó un valor promedio de $\delta^{18}\text{O}$ -5,2 ‰, de $\delta^2\text{H}$ -32 ‰, y de d 10 ‰. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ oscilaron entre -6,1 y -4,2 ‰, mientras que los de $\delta^2\text{H}$ variaron entre -39,8 y -25,3 ‰. El exceso de deuterio d presentó un mínimo y un máximo de 1 y 15 ‰ para toda el área. En la Figura 128 se exponen los resultados isotópicos con la recta meteórica regional teniendo en cuenta la región hídrica, siendo la región R1 caracterizada en su mayoría por pozos con niveles piezométricos profundos y la región R2 por pozos con niveles someros. Se pone de manifiesto que la composición isotópica del agua subterránea es consistente con la composición isotópica de las precipitaciones representada por las rectas meteóricas global y regional.

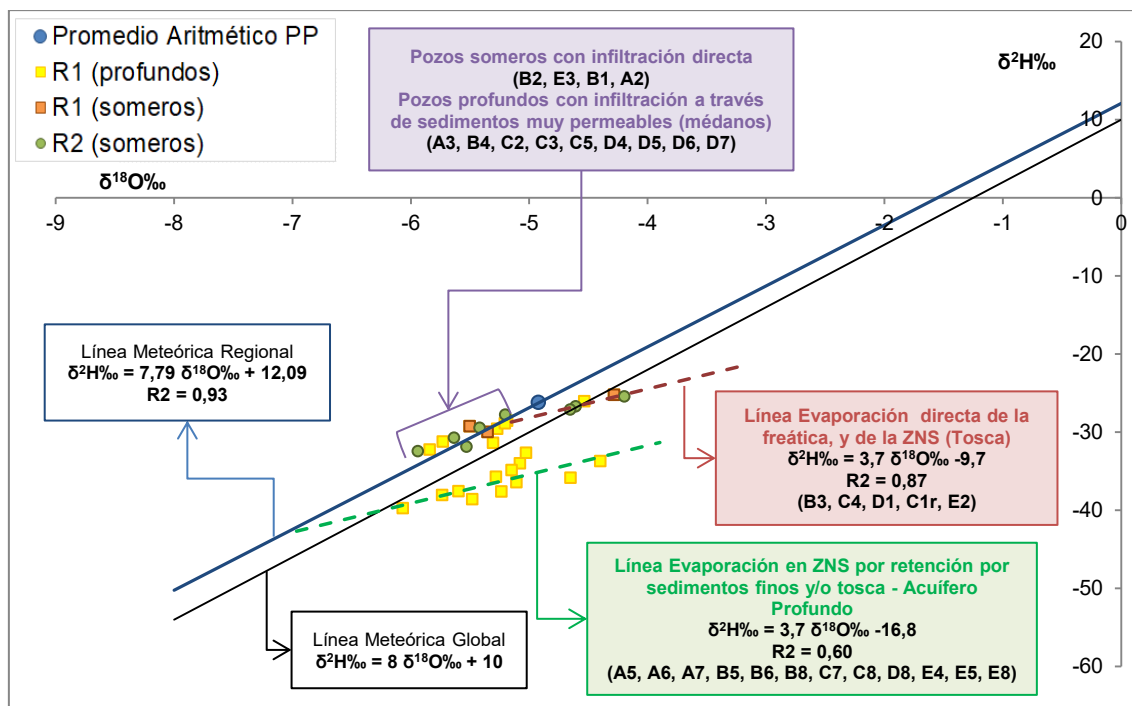


Figura 128. $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua subterránea del área de estudio, por región junto a la recta meteórica global, la recta meteórica regional y el valor promedio ponderado de las lluvias de ambas estaciones para el periodo 2014 - 2022.

Las precipitaciones son la principal entrada de agua al sistema hídrico subterráneo, y cuando alcanza la superficie puede alterarse ya sea por evaporación o por mezcla de aguas con otra composición, siendo influenciada por el tiempo de permanencia que presente sobre la superficie, que a su vez depende de la permeabilidad de los sedimentos o su cercanía con el nivel freático. Es decir que si la permeabilidad es elevada y la infiltración rápida, la composición isotópica del agua infiltrada puede ser idéntica o similar a la de las precipitaciones.

Dentro del área de estudio, en la Figura 128, se observa un grupo de muestras que se sitúan por encima de la recta meteórica regional con excesos de deuterio $\geq 10 \text{‰}$ similares a la precipitación, compuesto por pozos cuyos niveles piezométricos (NP) se encuentran someros (tanto de la región R1 como de la región R2), por lo que la precipitación alcanza la freática rápidamente y mantiene la misma composición isotópica; y pozos con niveles piezométricos profundos de la región R1 ($25\text{m} < \text{NP} < 75\text{m}$) que se ubican en zona de médanos, presentando una rápida infiltración del agua de lluvia debido a la gran permeabilidad de los sedimentos arenosos, manteniendo también la misma composición. Otra característica importante de este grupo es que la mayoría de las muestras son bicarbonatadas sódicas o bicarbonatadas/sulfatadas sódicas, tipos de agua característicos de zonas de recarga.

No obstante, cabe destacar que de la Figura 128 se observa otro grupo de muestras enriquecidas que conforman una línea de evaporación (rojo), definida por la ecuación $\delta^2\text{H}\text{‰} = 3,7 \delta^{18}\text{O}\text{‰} - 9,7$, con excesos de deuterio $\leq 10 \text{‰}$. Éste

se encuentra constituido por dos muestras de pozos muy someros cuyo nivel freático se encuentra a 3 y 6 metros, indicando un proceso de evaporación directa de la freática; y tres muestras cuyo nivel piezométrico se encuentra entre los 21 y 40 metros de profundidad que presentaron procesos de evaporación previos a la infiltración o desde la zona no saturada que retiene el agua durante saturada (ZNS), situación característica de regiones con tosca en superficie o a poca un mayor tiempo y ralentiza la infiltración. Esta particularidad de la tosca cercana o en superficie fue confirmada en campo. Estas aguas tienden a ser mayormente mixtas sódicas.

Por último, dentro del mismo análisis, se encuentra un grupo de muestras pertenecientes a la región R1, extraídas en su totalidad de pozos con niveles piezométricos profundos ($55\text{m} < \text{NP} < 122\text{m}$), que generan una línea de evaporación (verde) definida por la ecuación $\delta^2\text{H}\text{‰} = 3,7 \delta^{18}\text{O}\text{‰} - 16,8$ con excesos de deuterio $\leq 10 \text{‰}$ (entre 1 y 9 ‰). Esta situación se atribuye a procesos de evaporación previos a la infiltración o desde la zona no saturada (ZNS) debido a la presencia de sedimentos más finos y/o también, a la presencia de tosca en superficie o a poca profundidad, que retrasa la infiltración al quedar el agua retenida favoreciendo la evaporación. Estas aguas son en su mayoría muy evolucionadas, de los tipos clorurada sódica y mixta sódica.

Con el objetivo de visualizar mejor las líneas de evaporación mencionadas, se efectuó un gráfico entre la relación del contenido de cloruros y la composición de $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua subterránea, diferenciando los grupos mencionados en la figura anterior (Figura 129). A partir de esta figura se puede reconocer a la evaporación como uno de los principales procesos modificadores de la composición isotópica, identificada principalmente en el aumento del contenido de cloruros y en el enriquecimiento en $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras conformadas por: la línea de evaporación directa desde el nivel freático o desde la ZNS debido a la retención de agua por la tosca; y las muestras del acuífero profundo, que presentan evaporación previa a la infiltración o desde la ZNS por retención de agua por la tosca y/o por capas de sedimentos finos. De igual forma, se detecta un proceso de disolución de sales por tránsito definido por un aumento en la concentración de cloruro sin modificación en el contenido isotópico, como se observa en las muestras de infiltración directa correspondientes a zonas de médanos y pozos con niveles piezométricos someros.

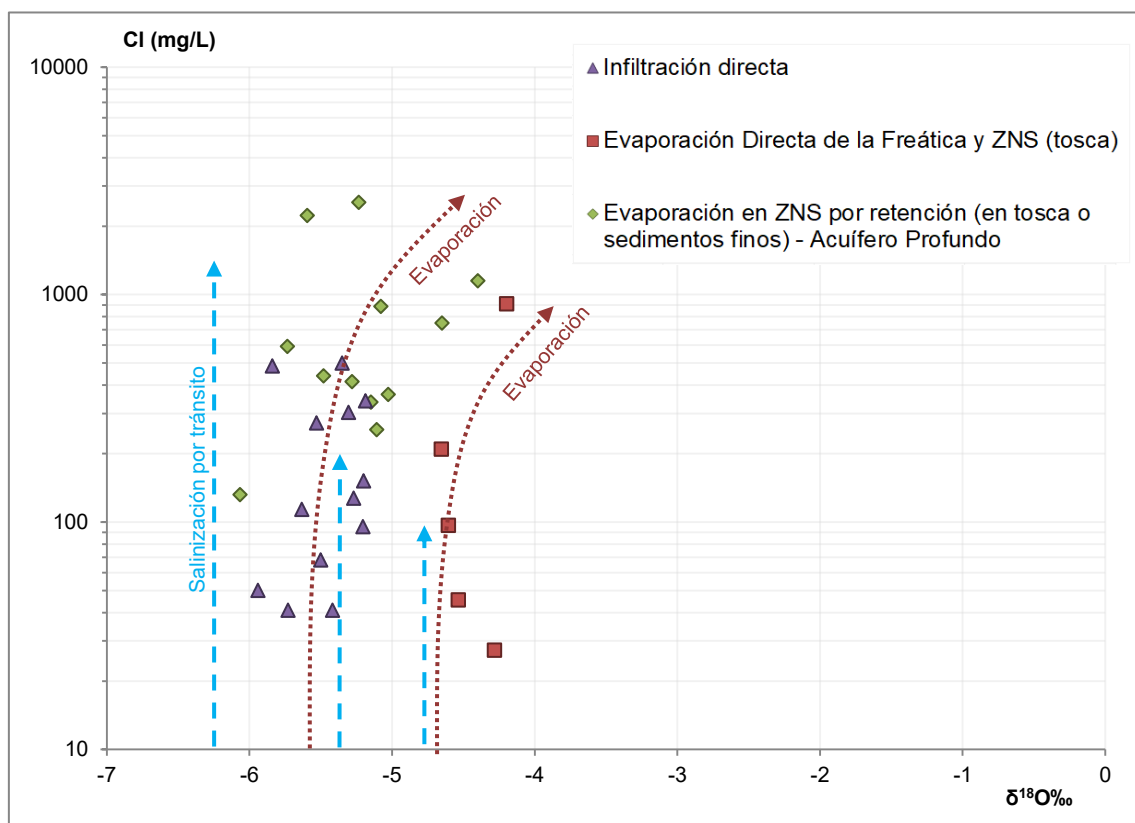


Figura 129. Contenido de Cl^- (mg/L) en relación a la composición de $\delta^{18}\text{O}$, de las muestras de agua subterránea, según distintos procesos identificados.

12 FASES PORTADORAS DE ARSÉNICO

12.1 Introducción

La extensa área de la Llanura Chacopampeana, que abarca gran parte del centro y este de la Argentina, está caracterizada por presentar elevadas concentraciones de arsénico y otros elementos como el fluoruro, vanadio, estroncio, molibdeno, boro, etc. en las aguas subterráneas, razón por la cual el aprovechamiento para el consumo humano se encuentra fuertemente limitado. Actualmente, se ha confirmado que la problemática del arsénico se ha extendido más allá de esta región, abarcando también las provincias de Mendoza, San Juan y la Patagonia (Gómez *et al.*, 2019; Funes Pinter *et al.*, 2018).

El *Acuífero Pampeano* es uno de los más importantes en extensión y por ser fuente de abastecimiento de un tercio de la población del país y de actividades agropecuarias e industriales (Schulz y Castro, 2003). Las concentraciones de elementos como el arsénico y fluoruro en sus aguas superan las normativas nacionales, por lo que su uso está sujeto a un previo procesamiento para reducir tales concentraciones a valores admisibles.

La exposición crónica a este elemento puede causar efectos perjudiciales para la salud, generando diferentes afecciones tales como cáncer, hiperqueratosis, hiperpigmentación y otras con efectos gastrointestinales, hematológicos, entre otros (Smith *et al.*, 1998; Castro de Esparza, 2009; Bundschuh *et al.*, 2009; Brouwer *et al.*, 1992; Chen *et al.*, 1992). Su estudio se profundizó al registrar en Córdoba casos de Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), producida por el consumo de agua con concentraciones elevadas de arsénico a través del agua de bebida para consumo (Schulz *et al.*, 2005) e incluso proveniente de los alimentos (Bundschuh *et al.*, 2012).

El arsénico presente en estas fuentes de agua natural se atribuye como resultado de actividades humanas o por características litológicas propias del medio de donde se encuentra. Según Paige *et al.* (2006), globalmente, los procesos naturales contribuyen aproximadamente en un total de 40.000 toneladas anuales de arsénico en el ambiente, mientras que las actividades humanas duplican estas cantidades.

En la provincia de La Pampa se ha detectado esta problemática desde el comienzo de la explotación del acuífero, en la mayoría de los estudios de fuentes realizados para abastecimiento poblacional por la Administración Provincial del Agua. Recientemente, en el noreste de la provincia, se encuentran los estudios realizados por Saguas (2023) y Ceballo (2020), en los que determinan que el agua extraída de la gran mayoría de las perforaciones

de abastecimiento se encuentran excedidas en este oligoelemento, generando la necesidad de un procesamiento previo del agua para ser utilizada para consumo humano en todas las localidades que se encuentran en esta región, a través de plantas de ósmosis inversa. En el sector de estudio, las concentraciones de arsénico encontradas en las muestras de agua de la mayoría de las perforaciones de abastecimiento superan notablemente los valores mínimos permitidos según la OMS (2011) y el Código Alimentario Argentino (CAA, 2021) de 0,01 y 0,05 ppm respectivamente. Todas las localidades cuentan con una planta de remoción de arsénico para lograr disminuir los tenores del oligoelemento.

La presencia de arsénico inorgánico natural y su concentración en aguas subterráneas varían notablemente de unas zonas a otras, y existen una multiplicidad de factores y condiciones que afectan la presencia y concentración del elemento en cuestión en el agua. Uno de los factores más importantes son las características litológicas de las rocas en contacto con el agua. El arsénico es liberado al agua desde los sedimentos que lo contienen y su distribución espacial es más bien anárquica, con grandes variaciones también en profundidad (Sierra *et al.*, 2018; Aullón Alcaine *et al.*, 2020; Bhattacharya *et al.*, 2006; Nicolli *et al.*, 2005).

El *Acuífero Pampeano* está compuesto por una secuencia sedimentaria con predominio de loess de edad cuaternaria. Estas formaciones geológicas contienen además vidrio volcánico derivado de la actividad volcánica de la Cordillera de los Andes. La fuente principal de arsénico serían las trizas de vidrio volcánico presentes en este material loésico, que además presentan en su mayoría composición riolítica (Nicolli *et al.* 1989). Algunos de los principales procesos por el cual se libera arsénico, confirmado por varios autores (Smedley *et al.*, 2005; Borzi *et al.*, 2015; Dietrich *et al.*, 2016), es a partir de la disolución de los vidrios volcánicos, la desorción desde los óxidos e hidróxidos de hierro, y la liberación a partir de la disolución de la calcita presente en los horizontes petrocálcicos. Este último, conocido normalmente como tosca, se encuentra intercalada dentro de la formación loésica y se expande en gran parte de la provincia de La Pampa incluyendo en la totalidad del área de estudio, exceptuando algunas zonas de médanos, principalmente de la región R1, variando su profundidad y espesor. Este material tendría la capacidad de retener arsénico a través de mecanismos como la coprecipitación y la adsorción. A su vez, por cambios en las características hidroquímicas del agua subterránea (pH, potencial redox, etc.) puede disolverse y devolver ese arsénico retenido a la solución (Yokoyama *et al.*, 2012; Vital *et al.*, 2019). Además, en la movilización del arsénico, principalmente en los procesos de adsorción-desorción, intervienen, en orden decreciente de capacidad de

adsorción, los óxidos e hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio principalmente (INTI, 2009).

Para lograr determinar y conocer la complejidad de la movilidad de este oligoelemento, es importante conocer de forma detallada la litología y mineralogía del subsuelo con una descripción lo suficientemente precisa que permita definir la heterogeneidad litológica y textural del loess. Con el objetivo de comprender la asociación del arsénico a fases sólidas portadoras del área de estudio, se utilizaron procedimientos de extracciones secuenciales de arsénico en sedimentos de una perforación de la localidad de Arata, los cuales fueron sometidos a distintos análisis sedimentológicos para lograr una descripción lo más detalla posible. Existen antecedentes de esta técnica aplicada principalmente en sedimentos loésicos de la provincia de Buenos Aires (Dietrich *et al.*, 2016; Cacciabue *et al.*, 2016; Dietrich *et al.*, 2022).

12.2 Muestras de sedimentos

Los sedimentos utilizados para la aplicación de los procedimientos de extracción de arsénico en laboratorio fueron extraídos de la perforación realizada en la localidad de Arata para luego ser sometidos a varios análisis sedimentológicos (apartado 2.3 del capítulo 2 de Materiales Y Métodos). Las muestras de sedimentos fueron extraídas cada 2 metros, cuya descripción litológica y textural fue realizada en el apartado 4.2.2.1, y mineralógica en el apartado 4.2.2.3 del capítulo 4 de Geología.

El subsuelo se caracterizó por unos primeros dos metros de un estrato mayormente arenoso, con abundantes pátinas de óxidos de Mn y Fe, y hasta los 12 metros de profundidad por niveles con mayor cantidad de limo con un contenido de pátinas de óxidos de Mn y Fe y calcita que se incrementa con la profundidad.

Para aplicar los procedimientos de extracción se utilizaron sólo cuatro muestras de sedimentos, sujeto al contenido de limo (%) y arcilla (%), de pátinas de óxidos de Mn y Fe descriptas en la litología, y el contenido de carbonato de calcio. En la Tabla 29 se realiza un resumen de las características de los sedimentos seleccionados. Todas las muestras presentan un alto contenido de fracción limosa, siendo la más elevada la correspondiente a la muestra M4 (Figura 130). Las muestras M2 y M3 son las de mayor abundancia de óxidos de Mn y Fe, mientras que las de mayor contenido de carbonato de calcio son las muestras M2 y M4 (Figura 131). Las muestras M1 y M2 son muy similares texturalmente, pero se diferencian en que la primera se destaca por un contenido bajo de pátinas de óxidos y baja concentración de carbonato respecto a M2 y al resto de las muestras.

Tabla 29. Características, litológicas, texturales y mineralógicas de las muestras de sedimentos seleccionadas para el desarrollo de los PES.

Extracción		Litología		Parámetros Físicoquímicos			Textura			Mineralogía
Muestra	Prof. (m)	%	Descripción Litológica	% CO ₃ ²⁻	pH	CE (μS/cm)	% Arcilla (0-3,9 μm)	% Limo (3,9 – 62,5 μm)	% Arena Total (62,5-2000 μm)	Minerales identificados con Difractometría de rayos X
M1	6 -10	100	Limolita: marrón moderado (5YR 3/4), localmente algo arenosa muy fina, en bloque, fractura irregular, sin reacción calcárea, incremento leve en el contenido de pátinas de MnO.	0,9	8,7	515	10,11	46,51	43,38	Andesina, Cuarzo, Montmorillonita
M2	12 - 14	90	Arenisca limosa: marrón moderado (5YR 4/4), muy fina, cuarzo, líticos oscuros, muy buena selección, abundante MnO, localmente fuerte reacción calcárea.	4,2	8,85	540	9,76	46,2	44,04	Andesina, Cuarzo, Montmorillonita, Calcita
		10	Calcarenita: naranja amarillento oscuro (10YR 6/6), incluye arena muy fina y gránulos de limo, con calcita micritica, fractura irregular, dura.							
M3	20 - 22	100	Arenisca limosa: marrón moderado (5YR 4/4), muy fina, cuarzo, líticos oscuros, muy buena selección, con abundante MnO. Con porosidad secundaria.	3	8,92	552	11,09	49,23	39,68	Andesina y Cuarzo, Montmorillonita
M4	44 - 46	60	Arenisca limosa: marrón moderado (5YR 4/4), marrón grisáceo (5YR 3/2), muy fina a fina, subredondeada, muy buena selección, cuarzo, líticos subordinados, con porosidad secundaria.	8,4	8,99	842	15,1	65,18	19,72	Andesina, Cuarzo, Calcita, Montmorillonita
		40	Calcarenita: marrón amarillento oscuro (10YR 6/6), con cuarzo y líticos muy finos, dura, compacta, fractura irregular a concoidea, en parte con nódulos limo-arcillosos.							

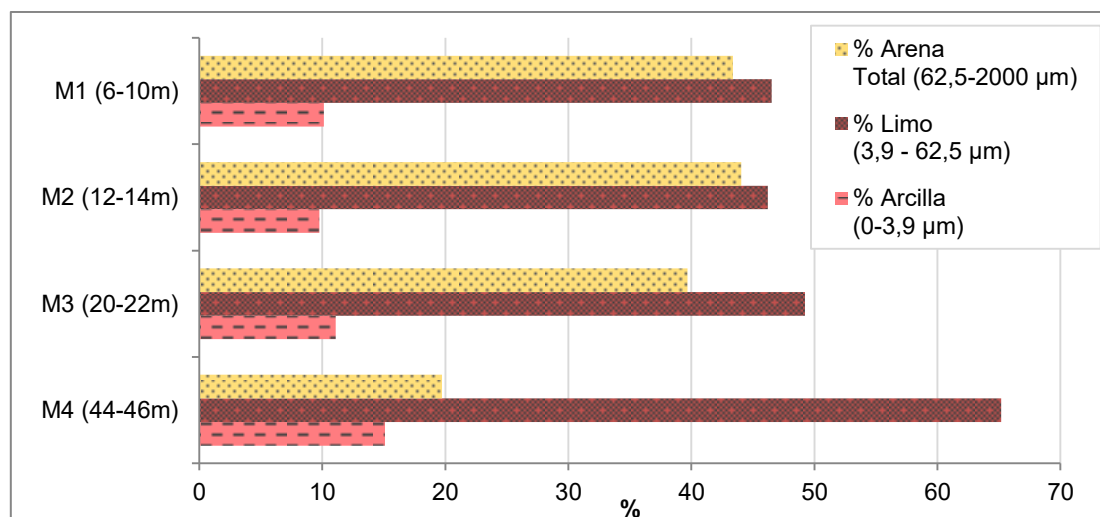


Figura 130. Resumen textural de las muestras de sedimentos seleccionadas para el desarrollo de los PES.

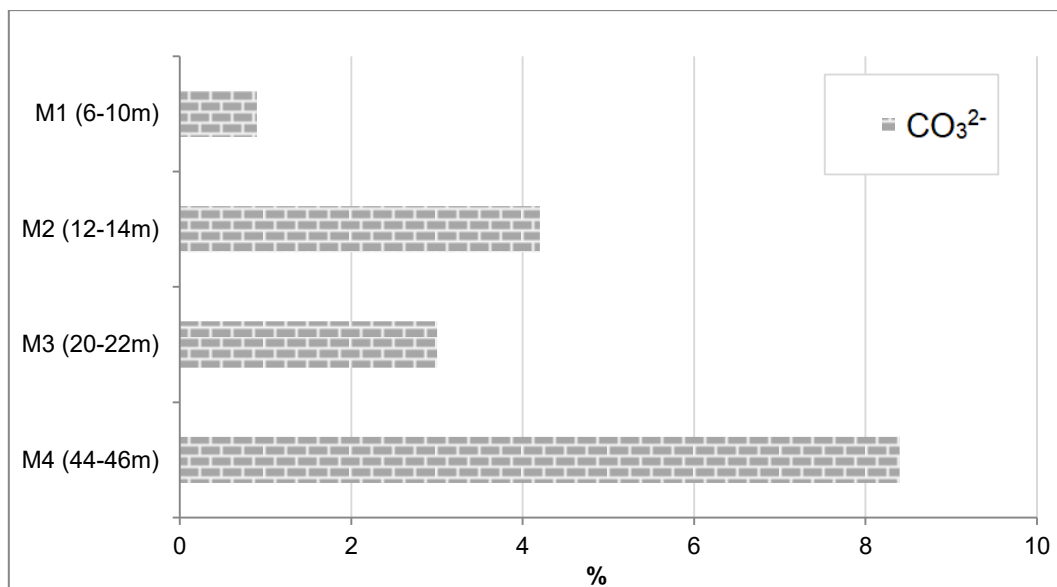


Figura 131. Resumen del contenido de CO_3^{2-} en las muestras de sedimentos seleccionadas para los PES.

Posteriormente, previo al comienzo de los procedimientos de extracción, las muestras de sedimentos pasaron por un tratamiento a partir del cual sólo se utilizó la fracción de limo y arcilla, incluyendo hasta el tamaño de grano de 62,5 μm . Esta descripción metodológica se halla en el apartado 2.8 del capítulo 2 de Materiales Y Métodos.

12.3 Extracciones secuenciales (PES) de arsénico

Los procedimientos de extracción secuencial (PES) de arsénico (As) en sedimentos de la perforación realizada en Arata, están basados en lo propuesto por Cacciabue *et al.* (2016) y Keon *et al.* (2001) con algunas modificaciones tomadas del procedimiento sugerido por Dold (2003) más específico para estudios sobre residuos mineros y Bettoschi *et al.* (2018) aplicado a sedimentos marinos.

El procedimiento consistió en colocar 1 g de cada muestra en contacto con 30 ml de la solución reactiva extractante en tubos de centrifuga de polipropileno (PPCO), descrito de manera detallada en el apartado 2.8 en el capítulo de Materiales Y Métodos. También se describe el tipo de reactivo utilizado en cada paso y en las condiciones necesarias (agitación, pH, temperatura, etc.) en la Tabla 1.

En la Tabla 30 se detallan las cantidades obtenidas en $\mu\text{g/L}$ de arsénico en cada uno de los pasos de los PES por muestra. Los resultados obtenidos fueron resumidos, en porcentajes, en la Figura 132. Es importante aclarar que el PES no contempla una digestión total de la muestra de sedimentos, por lo tanto el 100% corresponde a la suma total liberada en cada paso por muestra.

Tabla 30. Resultados de arsénico en $\mu\text{g/L}$ extraído en cada paso de los PES:

Arsénico ($\mu\text{g/L}$)	M1	M2	M3	M4
Paso 1	13	23	10	17
Paso 2	5	5	5	11
Paso 3	23	37	34	36
Paso 4	13,5	14,5	14,5	16,5
TOTAL	55	80	64	81

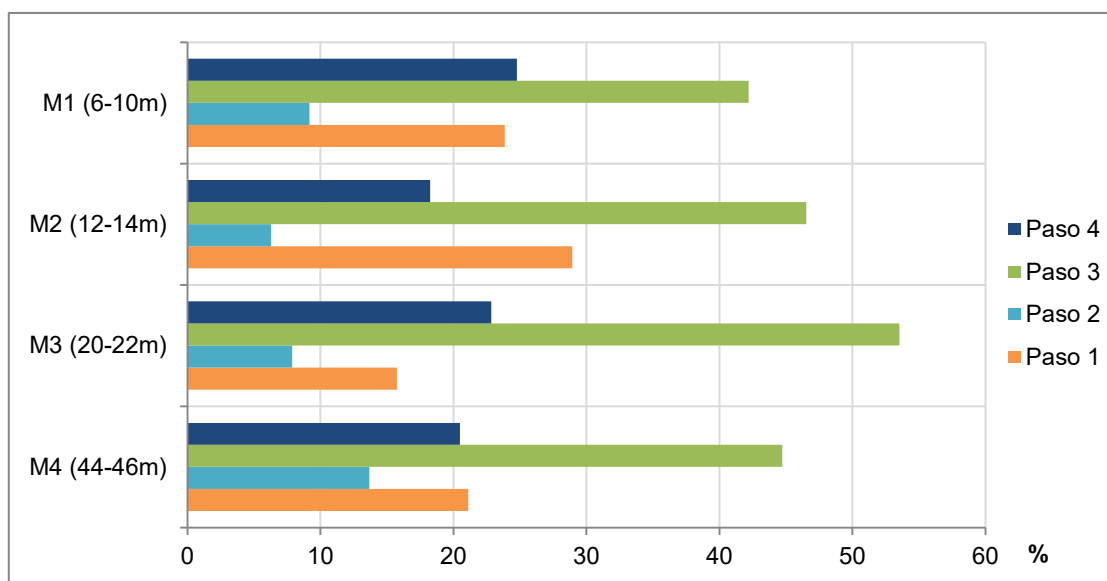


Figura 132. Porcentajes de As en cada paso de extracción secuencial.

En relación al gráfico presentado, puede observarse que las muestras con un mayor contenido de arsénico total son las M2 y M4, caracterizadas por un contenido de carbonato y calcita elevado. Mientras que la muestra de menor concentración de As es la M1 y se destaca su contenido bajo de pátinas de óxidos de Mn y Fe y baja concentración de carbonato.

El arsénico ligado a sales solubles y aquel ligado iónicamente (paso 1) presentó concentraciones entre un 16% y 29% del arsénico total extraído en los PES, siendo mayor en la muestra M2. Por bibliografía antecedente se sabe que el As no está asociado a fases minerales solubles, por lo que el porcentaje de esta fase representa principalmente al arsénico ligado iónicamente (Cacciabue *et al.*, 2016).

Por su parte, el arsénico fuertemente adsorbido fue el paso que presentó menor porcentaje de As extraído, variando entre un 6% y un 14%, siendo mayor en la muestra M4. Según Kanematsu *et al.* (2010), es esperable que este paso libere un porcentaje considerable de As de las muestras, considerando que el anión fosfato es un competidor importante del As, sin embargo, fue el porcentaje más bajo. Cacciabue *et al.* (2016) consideran que el proceso de competencia del fosfato con el As es relativamente lento, por lo que

probablemente se debería haber dejado más tiempo en contacto el sedimento con la solución.

El paso 3 extrajo el mayor porcentaje de arsénico en todas las muestras y es aquel co-precipitado con carbonatos, óxidos de Mn e hidróxidos de Fe muy amorfos. Los valores oscilaron entre un 42% y 54%, siendo el mayor detectado en la muestra M3. Considerando el porcentaje alto de carbonatos y óxidos que presentan las muestras, es de esperarse que esta fase sea la que mayor aporte de arsénico genere. Comparado con Cacciabue *et al.* (2016), este paso no generó elevados porcentajes pero destaca que los carbonatos de la muestra estudiada eran bajos.

Por último, el paso 4 generó porcentajes similares a los del paso 1. El As extraído corresponde a aquel co-precipitado con óxidos e hidróxidos de Fe y Mn amorfos y óxidos de Fe bien cristalizados. Los porcentajes variaron entre un 18% y 25% respecto a las demás fases, siendo mayor en la muestra M1. En este paso se estarían disolviendo fases de baja y alta cristalinidad y el As atrapado en su estructura. Cacciabue *et al.* (2016) en su caso de estudio, determina que las fases con un mayor grado de cristalinidad son las que mayor contenido de As presentan. Este paso también coincide con la mayor extracción de Fe y Mn de las muestras, lo que es de esperarse considerando que las muestras tienen en general un contenido elevado de óxidos e hidróxidos de Fe y Mn.

En conclusión, los resultados de los procedimientos de extracción secuencial de arsénico indican que el mayor porcentaje de este elemento liberado proviene principalmente de la fase adsorbida y co-precipitada con carbonatos, óxidos de Mn e hidróxidos de Fe.

13 CALIDAD DE AGUA

13.1 Aptitud del agua para consumo humano

El *Acuífero Pampeano*, por su utilización para abastecimiento para consumo humano, es uno de los más importantes de la región. Presenta una alta variabilidad en la calidad del agua en su distribución espacial. La provincia de La Pampa presenta una fuerte dependencia por el recurso subterráneo, al igual que gran parte de la provincia de Córdoba y el sector oeste de la provincia de Buenos Aires, por lo que se convierte en un recurso primordial para el sustento y desarrollo socioeconómico. La escasez de recursos superficiales ha llevado a la provincia a la explotación subterránea desde la década del '70, realizando obras de construcción de abastecimiento de agua potable para sus ciudades más grandes, tales como Santa Rosa y General Pico (Schulz *et al.*, 2005).

A medida que la demanda poblacional aumenta en el transcurso del tiempo, exige una mayor explotación del acuífero, lo que provoca la producción de agua con mayor contenido de estos elementos. La mayoría de las localidades del noreste de la provincia cuentan con una provisión de agua a través de una red de distribución asociada a una planta de ósmosis inversa para lograr disminuir los tenores de los elementos excedidos (Foto 23).



Foto 23. Planta de ósmosis inversa y servicio de agua potable para la comunidad brindado por la COSEPAR (Cooperativa de Servicios Públicos de Arata), en la localidad de Arata.

En el sector de estudio la mayor problemática es generada por las concentraciones elevadas de fluoruro y arsénico y en algunos casos de nitrato, encontradas en la mayoría de las perforaciones realizadas para abastecimiento de agua para consumo, que superan notablemente los valores mínimos admisibles por la OMS (2011) y el Código Alimentario Argentino (CAA, 2021).

Las concentraciones elevadas de nitrato se relacionan con fuentes puntuales y no puntuales de contaminación como el uso de fertilizantes en agricultura, la descarga de residuos líquidos y sólidos urbanos e industriales, desechos de animales y la descarga de líquidos cloacales a través de fosas sépticas. Este compuesto químico se reduce en el cuerpo humano y es capaz de transformar la hemoglobina de los glóbulos rojos en metahemoglobina, una molécula que no es capaz de transportar oxígeno en la sangre, provocando una intoxicación por envenenamiento llamada metahemoglobinemia o síndrome de “bebés azules” (Fritsch y De Saint Blanquat, 1985) que afecta principalmente a lactantes menores de un año, por la inmadurez de su sistema enzimático.

Por su parte el fluoruro presente en aguas subterránea, al igual que el arsénico, está asociado a minerales de origen volcánico comunes en la composición de los sedimentos de la región (Smedley *et al.*, 2000). Dosis excesivas de este elemento son perjudiciales para la salud, que como consecuencia genera fluorosis dental (manchas en la dentadura) y fluorosis esquelética (deformación de los huesos) que puede conducir a la osteoporosis con casos extremos de invalidez (Guibaldo, 2010).

Mientras que el arsénico, elemento que ha sido descrito en capítulos anteriores, puede causar efectos perjudiciales para la salud tales como cáncer, hiperqueratosis, hiperpigmentación, y otras con efectos gastrointestinales, hematológicos, entre otros. Además existe una enfermedad severa denominada Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), producida por el consumo cotidiano de agua con concentraciones elevadas de arsénico (Schulz *et al.*, 2005).

La aptitud del agua para consumo humano se definió en base al Artículo 982 del Código Alimentario Argentino (CAA), que a su vez se complementó con la Guía para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011). En la Tabla 31 se detallan los resultados obtenidos analizando las 52 muestras de agua correspondientes al área de estudio.

Como se anticipó, la mayoría de las muestras se encuentran excedidas principalmente en fluoruro con un 96% del total y en arsénico con un 83%. También se destaca un gran porcentaje de muestras que exceden en residuo seco y sulfatos principalmente, con valores de 75% y 62% respectivamente. Respecto a los nitratos y nitritos, indicadores de contaminación, un 21% y un 23% respectivamente del total de las muestras analizadas superaban los

valores recomendados por la normativa. Por último, respecto a los oligoelementos, de las 38 muestras que fueron analizadas un 8%, 11% y 32% estaban excedidas en los elementos aluminio (Al), hierro (Fe) y molibdeno (Mo) respectivamente, mientras que el resto se mantuvo por debajo del límite admisible.

Tabla 31. Parámetros de calidad de agua para consumo humano del CAA y la OMS.

Parámetro	Normativa	Valor de Referencia	Porcentaje de muestras excedidas (%)
R.S. (mg/L)	CAA	1500	75
Cl ⁻ (mg/L)	CAA	350	44
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	CAA	400	62
NO ₃ ⁻ (mg/L)	CAA	45	21
NO ₂ ⁻ (mg/L)	CAA	0,1	13
F ⁻ (mg/L)	CAA	0,3-1,2	96
As (µg/L)	CAA	50	83
Ba (µg/L)	OMS	700	0
Al (mg/L)	CAA	0,2	8
Mn (mg/L)	CAA	0,1	0
Ag (µg/L)	CAA	50	0
Cd (µg/L)	CAA	5	0
Cr (µg/L)	CAA	50	0
Fe (mg/L)	CAA	0,3	11
Cu (µg/L)	CAA	1000	0
Mo (µg/L)	OMS	70	32
Ni (µg/L)	CAA	20	0
Pb (µg/L)	CAA	50	0
Se (µg/L)	CAA	10	0
U (mg/L)	OMS	0,015	0
Zn (µg/L)	CAA	5000	0

Con el objetivo de comparar las regiones y los parámetros más excedidos se efectuó el gráfico de la Figura 133. Se observa que no hay diferencias significativas entre los porcentajes excedidos de cada región, presentando valores similares. En ambas regiones la problemática para consumo humano está determinada principalmente por los excesos de fluoruro y arsénico que exceden en el 80% de las muestras, continuado por exceso en las concentraciones de residuo seco, sulfato y cloruro. Se observa que el anión cloruro, en la región R1 excede un poco más en comparación con la región R2, evidenciado también en la cantidad de muestras determinadas hidroquímicamente como aguas cloruradas.

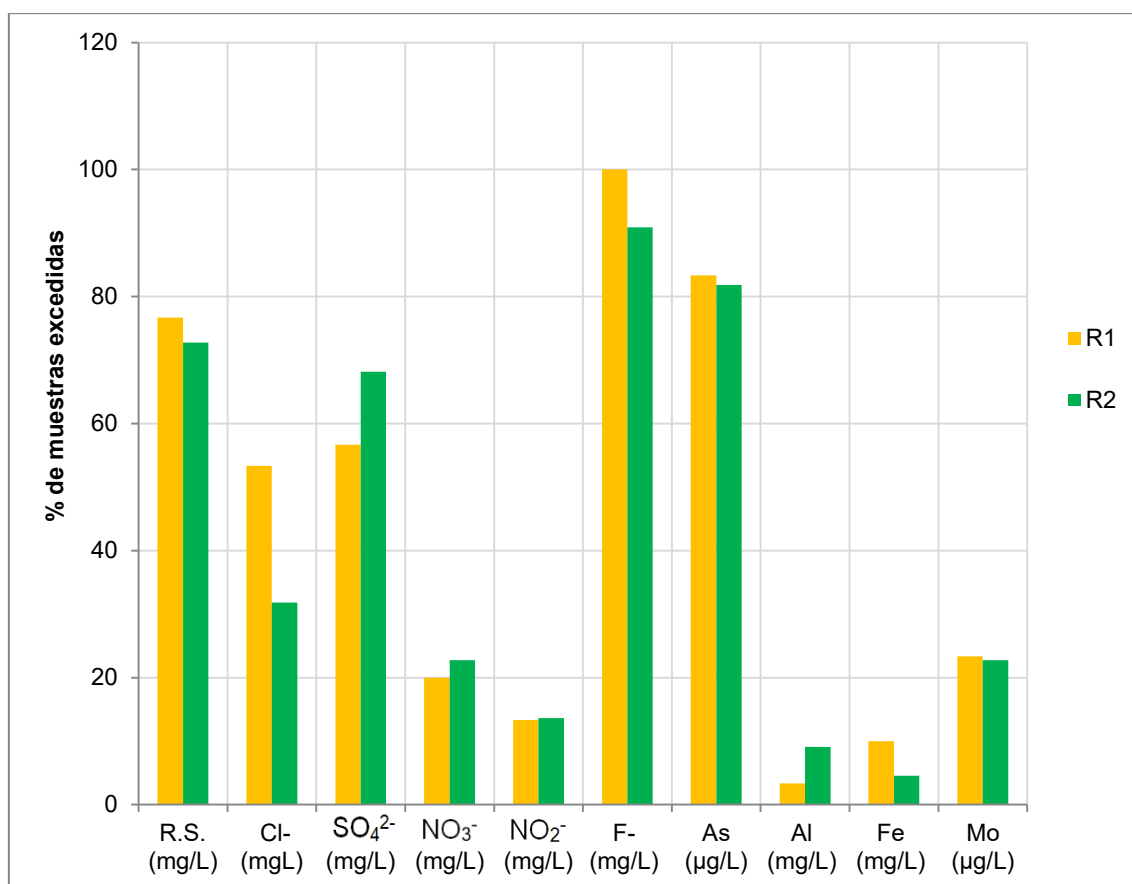


Figura 133. Porcentaje de muestras excedidas por región.

Considerando este análisis, se concluye entonces que ninguna de las muestras del área de estudio se encuentra apta para consumo humano, principalmente por exceso de fluoruro y arsénico. Además, se observaron otros parámetros cuyas concentraciones se encuentran excedidas respecto a los límites admisibles, pero presentando porcentajes menores que los mencionados anteriormente. Otros oligoelementos importantes a verificar y controlar sus concentraciones son el aluminio, el hierro y el molibdeno dado que en un porcentaje reducido de muestras también se detectaron concentraciones elevadas respecto a la reglamentación.

13.2 Aptitud para consumo ganadero

En el caso del uso para el abrevado del ganado bovino se utilizaron los criterios propuestos por Bavera (2001) para cría por ser los más usuales y ampliamente difundidos en el sector productivo y el principal tipo de explotación en el área de estudio (Tabla 32). Cabe aclarar que este método tiene un carácter orientativo debido a los múltiples factores que modifican los efectos del agua sobre los animales como son raza, edad, clima, tipo de alimentación, tiempo de exposición, grado de acostumbramiento y tipo de explotación.

Tabla 32. Criterios de calidad de agua para ganado bovino. TSD es el total de sólidos disueltos (valores en mg/l).

Tipo de Explotación	SDT	Cloruro	SO ₄ ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻
Cría					
Deficiente	< 1.000	-	-	-	-
Satisfactoria	> 1.000	600	500	200	50
Muy Buena	< 2.000	1,2	1	250	200
Buena	< 4.000	2,4	1,5	300	300
Aceptable	< 7.000	4,2	2,5	400	400
Mala Usable	< 11.000	6,6	4	500	500
Uso condicionado	< 13.000	10	7	600	---

Los resultados se encuentran resumidos en la Figura 134, en la cual se manifiesta un mayor porcentaje de muestras categorizadas como “buena” (56%), las cuales se caracterizan por un contenido salino del agua que supera las necesidades del animal pero no les ocasiona problemas, siempre que se elimine el exceso. La segunda categoría, con un mayor porcentaje de muestras, es la determinada como “muy buena” (33%), aguas que se caracterizan por contener una concentración de sales adecuada para cubrir las necesidades minerales que las pasturas no brindan, favoreciendo ello a la producción ganadera. Dentro de la categoría “aceptable” se encuentran un 10% del total de las muestras y son aguas capaces de causar diarreas a animales no acostumbrados y por ende, generar una disminución en la producción ganadera. Finalmente, sólo un 10% del total de las muestras analizadas se encontró dentro de la categoría “deficiente”, caracterizadas por contener un total de sales menor a 1.000 mg/L, por lo que el aporte a través del agua es prácticamente nulo en el ganado lo que se conoce como “hambre de sal” y afecta negativamente a la producción (Bavera *et al.*, 2001). En estos últimos casos es de gran importancia complementar el agua con sales minerales para alcanzar las necesidades básicas del ganado.

Se concluye que el contenido de sales del área de estudio es categorizado como “buena” y “muy buena” para cría de ganado bovino, representando un 89% del total de muestras analizadas. Aquellas aguas con un contenido de sales “deficiente” en general son complementadas con sales minerales para alcanzar los requisitos del ganado, según lo mencionado por los productores agropecuarios de la zona.

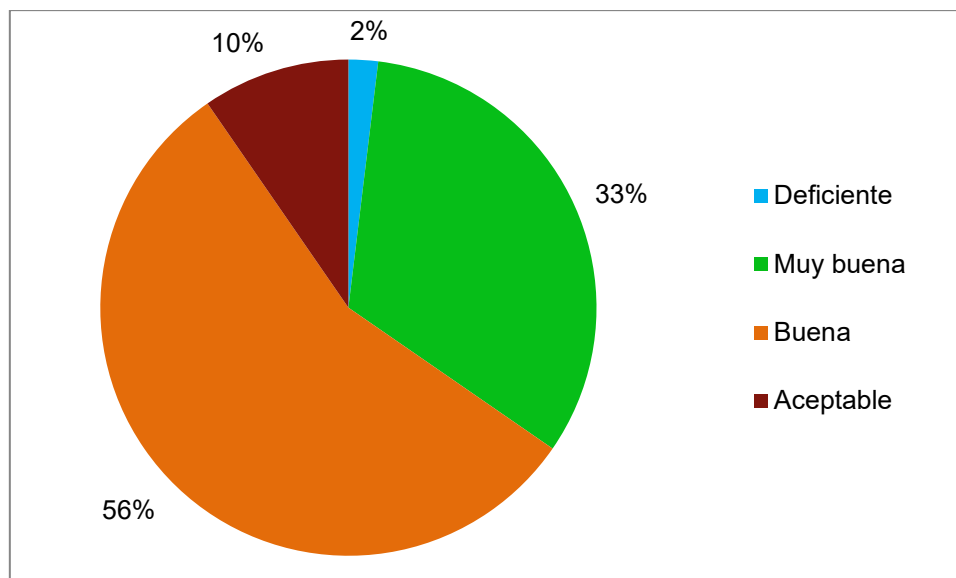


Figura 134. Porcentajes de las muestras categorizadas dentro de la clasificación de Bavera (2001).

13.3 Aptitud para riego

La calificación del agua para riego se basó en la norma *Riverside* (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954) que califica al agua en 4 clases según el peligro de salinización (C1 a C4, determinado por la conductividad eléctrica) y otras tantas en función del peligro de sodificación (S1 a S4, mensurable a través de la RAS), respectivamente. Se describen en las Tabla 33 y Tabla 34.

Tabla 33. Clasificación para el peligro de salinización del agua para riego según U.S. Salinity Laboratory Staff (1954).

	Conductividad Eléctrica	Clasificación	Observaciones
C1	100 a 250 $\mu\text{S/cm}$	Agua de baja salinidad	Puede usarse para la mayor parte de los cultivos en casi todos los suelos, con muy poco peligro de que desarrolle salinidad.
C2	250 a 750 $\mu\text{S/cm}$	Agua de salinidad media	Puede usarse con un grado moderado de lavado. Sin excesivo control de la salinidad se pueden cultivar, en la mayoría de los casos, las plantas moderadamente tolerantes a las sales.
C3	750 a 2.250 $\mu\text{S/cm}$	Agua altamente salina	No puede usarse en suelos de drenaje deficiente. Selección de plantas muy tolerantes a las sales y posibilidad de control de la salinidad del suelo, aún con drenaje adecuado.
C4	> 2.250 $\mu\text{S/cm}$	Agua muy altamente salina	No es apropiada en condiciones ordinarias para el riego. Puede utilizarse con una selección de cultivos en suelos permeables, de buen drenaje y con exceso de agua para lograr un buen lavado.

Tabla 34. Clasificación para el peligro de sodificación del agua para riego según U.S. Salinity Laboratory Staff (1954).

	Relación Adsorción de Sodio (RAS)	Clasificación	Observaciones
S1	< 10	Agua baja en sodio	Puede usarse en la mayoría de los suelos con escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable. Los cultivos sensibles pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.
S2	10 a 18	Agua media en sodio	Puede presentar un peligro en condiciones de lavado deficientes, en terrenos de textura fina con elevada capacidad de intercambio catiónico, si no contienen yeso.
S3	18 a 26	Agua muy alta en sodio	En la mayor parte de los suelos puede alcanzarse un límite de toxicidad de sodio intercambiable, por lo que es preciso un buen drenaje, lavados intensos y adiciones de materia orgánica. En los suelos yesíferos el riesgo es menor.
S4	> 26	Agua muy alta en sodio	En general es inadecuada para riego, excepto con salinidades bajas o medias, siempre que se pueda posibilitar su empleo con la disolución de calcio del suelo, el uso de yeso o de otros elementos.

Los resultados obtenidos (Tabla XI del Anexo) fueron resumidos en la Figura 135, a partir de la cual se determina que la gran mayoría de las aguas están categorizadas con un peligro de sodificación S4 y de salinización C4, con un porcentaje de 62% y 63% respectivamente. Son aguas altamente salinas y muy altas en sodio, por lo que no son recomendables para riego, y en caso de ser utilizadas, es importante emplear algún tratamiento del suelo como el uso de yeso u otros elementos y buenos lavados. Las segundas categorías más elevadas son las C3 y S3, con porcentajes de 33% y 27% respectivamente, clasificadas como aguas muy salinas y altas en sodio, por lo que las recomendaciones son similares a las categorías anteriores. Sólo un 2% de las muestras fueron categorizadas como C2 y un 10% como S2, determinadas como aguas con una salinidad media y un contenido de sodio medio. Pueden utilizarse empleando un buen lavado de suelos y aplicándolo en plantas con tolerancia a la salinidad y evitando suelos de textura fina.

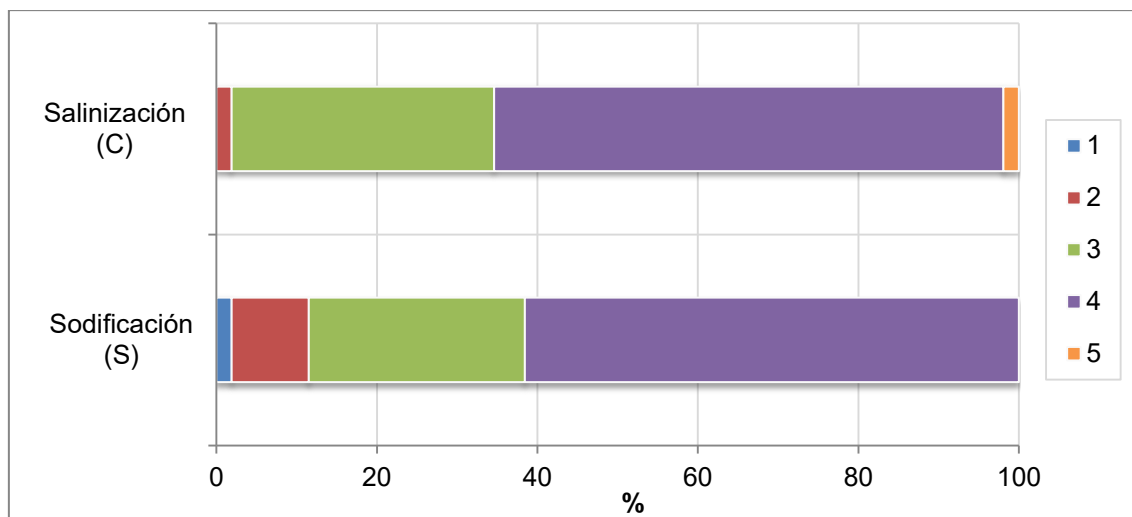


Figura 135. Porcentajes de las muestras categorizadas para riego según U.S. Salinity Laboratory Staff (1954).

14 MODELO CONCEPTUAL

14.1 Introducción

Los modelos hidrológicos conceptuales son representaciones simplificadas del sistema en dos o tres dimensiones, donde las variaciones espaciales de la composición del agua subterránea se explican a través de distintos procesos hidrogeoquímicos modificadores de la solución inicial, representada por el agua de lluvia durante su circulación a través de los diferentes subsistemas. Estos cambios que atraviesa el agua subterránea sería entonces producto de su interacción con la atmósfera y las distintas fases minerales presentes en la zona no saturada (ZNS) y en el acuífero analizado. Se considera también con un rol importante el denominado por Tóth (1963) como “ambiente hidrogeológico”, compuesto por la interacción de los aspectos climatológicos, geomorfológicos, geológicos, entre otros, de la zona estudiada, que puede afectar directa o indirectamente sobre el agua subterránea.

Además, estos modelos incluyen en su representación la morfología de los acuíferos, la posición de los niveles piezométricos y topográficos, el sentido del flujo subterránea, la delimitación de zonas de descarga, la relación agua superficial-subterránea, entre otros. Se realizan con base en el análisis e interpretación de la información geológica, hidrológica, hidroquímica e isotópica y permiten tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada.

Un modelo que incluye la evolución del agua en un sistema parte de la premisa que el agua incorporará una mayor cantidad de sustancias disueltas cuanto más distante y profunda sea su circulación, y que en consecuencia, se producirán cambios espaciales en sentido lateral y vertical. También es esperable que la mineralización ocurra secuencialmente, según un orden creciente de solubilidad de las distintas sales que aportan los iones principales (Chebotarev, 1955). En las aguas de recarga, debido al escaso tiempo de contacto agua-sedimento, prevalecen los iones bicarbonato y calcio, que rápidamente saturarán y serán reemplazados, en las áreas de conducción, por sulfato y magnesio para finalmente dar lugar a cloruro y sodio, como iones dominantes en las zonas de descarga. Este modelo simple asume que el único proceso actuante es la disolución y que los minerales involucrados están disponibles en el acuífero, condiciones que no siempre se cumplen en los sistemas hidrogeoquímicos.

14.2 Modelo Hidrogeológico Conceptual

Con el objetivo de comprender el funcionamiento del sistema hidrológico analizado, a partir de toda la información obtenida durante el desarrollo de este

trabajo, y considerando la variabilidad hidrológica, geomorfológica y geológica del área de estudio, se elaboraron dos modelos conceptuales que representarían por un lado, a la Región Hídrica de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1) hacia el oeste y por el otro, hacia el este, a la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central (R2).

La zona analizada representa un reducido sector del *Acuífero Pampeano*, que se extiende a lo largo y ancho de la Llanura Chacopampeana. Estratigráficamente, el principal reservorio hidrogeológico es la Formación Cerro Azul. Considerando que esta llanura es el resultado de numerosos ciclos orogénicos muy antiguos, el basamento del acuífero se encuentra a variadas profundidades ejerciendo un control sobre la hidrodinámica del flujo subterráneo. El basamento del área es la extensión de las Sierras Pampeanas Orientales y se encuentra afectado por un sistema de fallas que generó depocentros y levantamiento de bloques en el tiempo geológico. A partir de la prospección geofísica realizada, se definió una profundidad del basamento desde la localidad de Arata hasta el pueblo de Caleufú que varía entre los 230 y 250 m, profundizándose hasta 350 m en la localidad de Pichi Huinca. Esta zona se encuentra propuesta por Kostadinoff y Llambías (2002) como una posible extensión de la cuenca de Laboulaye. Hacia las localidades de Ingeniero Foster y La Maruja el basamento se profundiza y no es detectado con prospección geofísica, lo que era de esperarse, ya que se conoce que su profundidad en esta última localidad es de 700 m. Kostadinoff *et al.* (2006) proponen en esta zona una extensión de la cuenca de Nueva Galia conectándose con la cuenca de Laboulaye.

El flujo regional del agua subterránea coincide con la topografía regional, cuyo movimiento del agua es desde el extremo oeste hacia el este, con gradientes hidráulicos que disminuyen. En cambio, los flujos locales analizados no son coincidentes con la topografía posiblemente por el control estructural que generan las profundidades variables del basamento. Los mayores potenciales hidráulicos del área estudiada se ubican en la zona de médanos ubicada en el suroeste de la región R1 y en una franja noreste desde el norte de la localidad de Eduardo Castex, hacia Arata y Caleufú en la región R2 principalmente. El flujo local se moviliza hacia dos puntos principales, hacia el noroeste donde se encuentra la mayor profundización del basamento y de los niveles freáticos en la zona de La Maruja e Ingeniero Foster, y hacia el sur en la localidad de Conhelo, cuyos niveles también presentan una profundización brusca. El flujo regional, en cambio, se moviliza hacia el este y presenta zonas de descarga local como lo serían las lagunas de Chadilauquen y de Monte Nieves.

Todos estos factores geológicos, estructurales, litológicos y geomorfológicos del área estudiada generan una gran variabilidad de procesos actuantes y modificadores del agua subterránea durante su circulación a través de las

distintas fases del ciclo. Para una mejor interpretación del modelo conceptual propuesto para la zona de estudio se trazaron dos perfiles, uno en cada región hídrica, ubicados en la Figura 136.

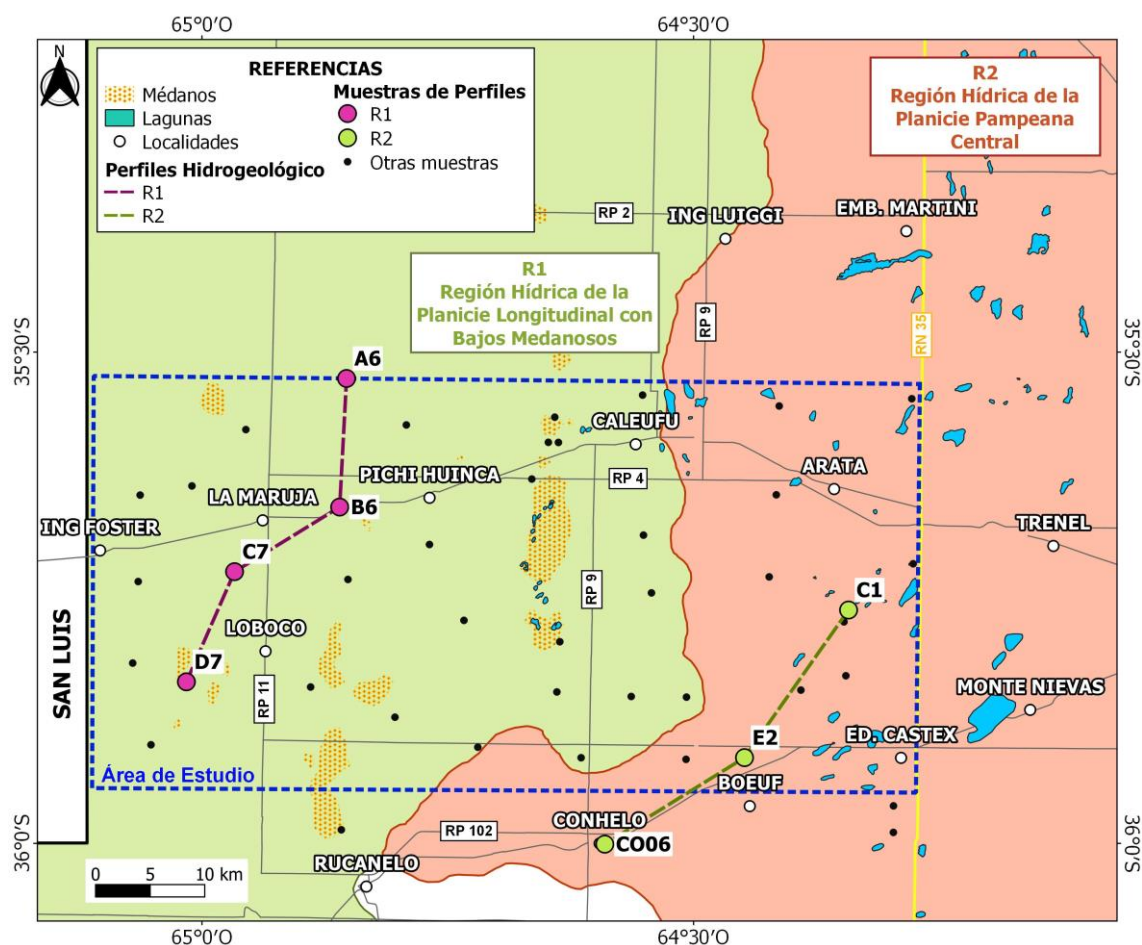


Figura 136. Ubicación de los perfiles correspondientes a los Modelos Hidrogeológicos Conceptuales de cada región.

El modelo de la Figura 137 representa un perfil SO-NO de la Región Hídrica de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1) y sus procesos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos característicos. En esta región predominan pozos de mayor profundidad debido a la profundización del basamento. La principal entrada de agua al sistema es la precipitación líquida, representada por aguas del tipo clorurada sódica y sulfatadas sódicas principalmente (Ceballo, 2020). Este último anión se destaca en el interior de los continentes (Custodio, 1983), lo que refleja el efecto de continentalidad que climáticamente presenta el área. En zonas de médanos (muestra D7), constituidos por la Formación Junín, la precipitación comienza a infiltrarse rápidamente debido a una mayor permeabilidad de los sedimentos, generando que la composición isotópica del agua lluvia sea similar a la del agua subterránea y además predominen aguas del tipo bicarbonatadas sódicas. A medida que atraviesa la zona no saturada y alcanza la Formación Cerro Azul, comienza un proceso de adquisición de sales por disolución de sales evaporíticas (halita, yeso,

carbonatos), incorpora CO_2 , y comienza el proceso de intercambio catiónico, en el cual se libera sodio a la solución y se remueve calcio y magnesio, principalmente el primero. En la fase saturada, los procesos que predominan continúan siendo la disolución, el intercambio catiónico y además se adhiere la hidrólisis de vidrio, procesos de desorción desde los carbonatos y óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, que se encuentra preferentemente en la Formación Cerro Azul, a partir del cual se comienza a liberar a la solución arsénico, fluoruro y otros oligoelementos como el vanadio. Además, no se descarta que ocurra un proceso de hidrólisis de feldespatos.

En la zona de transición local (muestras C7, B6 y A6), el agua adquiere una mayor profundidad y una mayor concentración de sales, variando de aguas del tipo sulfatadas/bicarbonatadas sódicas a cloruradas sódicas. Esta zona no se encuentra conformada por médanos sino que predomina la presencia del estrato calcáreo denominado tosca, en superficie o a muy poca profundidad. Este estrato ejerce una retención del agua infiltrada desde las precipitaciones, generando un proceso de evaporación previa a la infiltración en superficie o en la zona no saturada, cuya composición isotópica se empobrece en contenido de ^2H respecto a las precipitaciones. El resto de los procesos se mantienen constantes a medida que avanza el flujo a través de la ZNS y la zona saturada (ZS), adhiriéndose la posibilidad de remoción de calcio a partir de la precipitación de calcita, considerando que el agua se encuentre sobresaturada (situación que ocurre en un 60% de las muestras).

Por otra parte, el modelo conceptual característico de la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central (R2) está representado en la Figura 138 por un perfil NE-SO, junto a los principales procesos hidrogeoquímicos involucrados. Como en el modelo anterior, la principal entrada de agua al sistema hídrico es la precipitación líquida, cuya composición se modifica a medida que cambia de fases en el sistema hidrológico. Esta región presenta una mayor cantidad de pozos someros, comparado con la región anterior. En primera instancia, se observa un nivel estático muy somero que representa la principal zona de recarga de la región (muestra C1). El agua en esta zona se caracteriza por aguas bicarbonatadas sódicas, influenciadas por la rápida infiltración del agua de lluvia. A su vez, esta aproximación del nivel freático a la superficie genera la ocurrencia de un proceso de evaporación directo, proceso determinado por una composición isotópica empobrecida en ^2H en relación a la de la precipitación, lo que generó una línea de evaporación. En la zona saturada, los procesos que ocurren son los mismos que se mencionaron en el modelo anterior, incluyendo disolución de yeso, carbonatos, intercambio catiónico con liberación de sodio a la solución y adsorción de calcio a la fase sólida, liberación de As, fluoruro, vanadio entre otros oligoelementos por la hidrólisis de vidrio, disolución de carbonatos y desorción desde los óxidos e hidróxidos de manganeso y hierro, y

se adhiere la concentración de sales por evaporación directa del nivel freático (NF).

En la zona de transición (muestras E2 y CO06), el nivel freático se profundiza por la posible profundización del basamento en la localidad de Conhelo, y el agua se clasifica como clorurada sódica. En esta zona, la tosca se encuentra aflorando o a muy escasa profundidad y, al igual que el modelo anterior, genera una retención del agua de lluvia que favorece la evaporación previa a la infiltración en la ZNS, por lo que la composición isotópica en estas zonas presenta un empobrecimiento respecto a la del agua de lluvia. En el resto de la ZNS y durante la circulación de agua en la ZS, los procesos hidrogeoquímicos principales se vuelven a repetir, incluyendo también una posible remoción de Ca, debido a la precipitación de calcita considerando que es un mineral común en la zona, siempre y cuando el índice de saturación indique sobresaturación.

Cabe destacar entonces, la importancia que presenta la capa de carbonato de calcio denominada tosca en los procesos hidrogeológicos y en la liberación de arsénico al agua subterránea. Además, se destaca la deficiencia de calcio que presentan las aguas, postulando como principal proceso removedor al intercambio catiónico como también a la posible precipitación de calcita. Se resalta también, cómo influye en el comportamiento del acuífero la profundización del nivel freático, pudiendo existir evaporación directa cuando se encuentra somero. Es importante destacar también la presencia de médanos en la región R1, que generan una rápida infiltración y potenciales zonas de recarga.

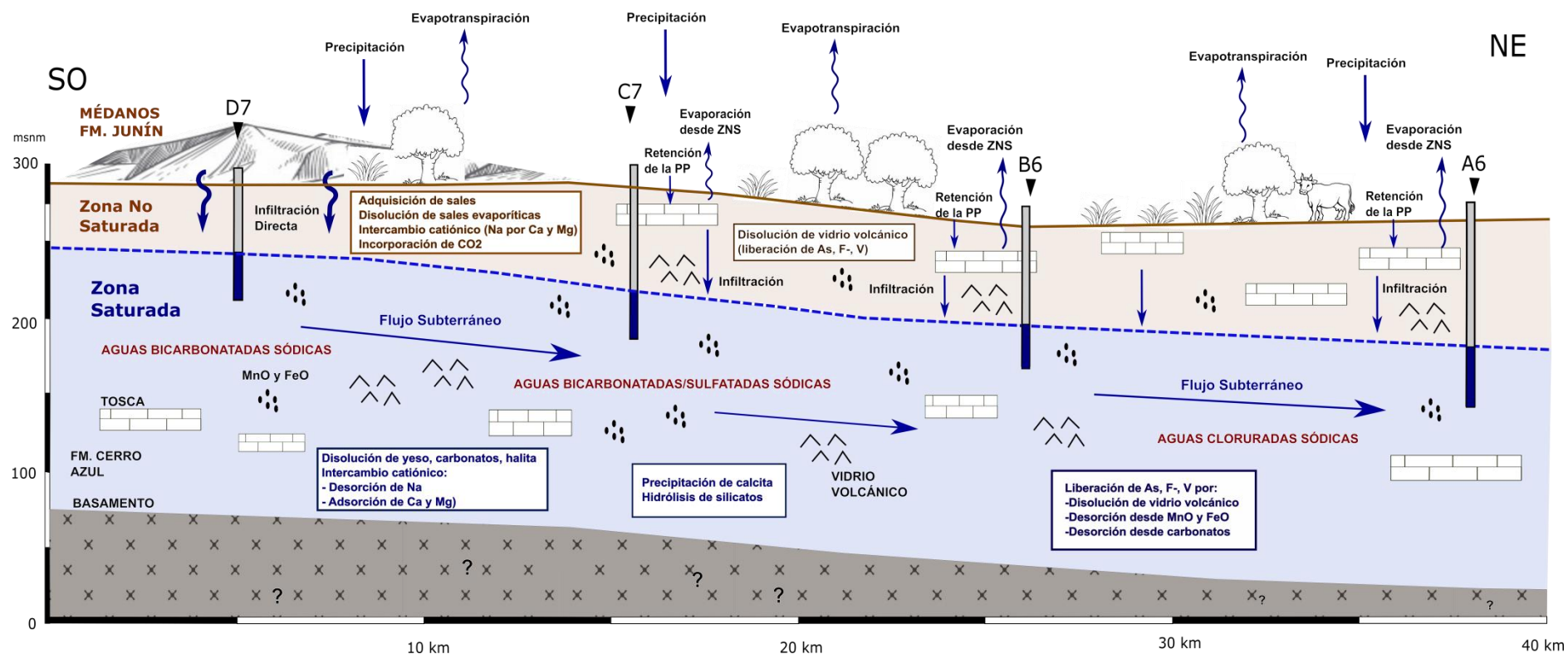


Figura 137. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Región Hídrica de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1) del área de estudio. *Los valores de profundidad de las perforaciones, del basamento y de las formaciones estratigráficas son esquemáticas.

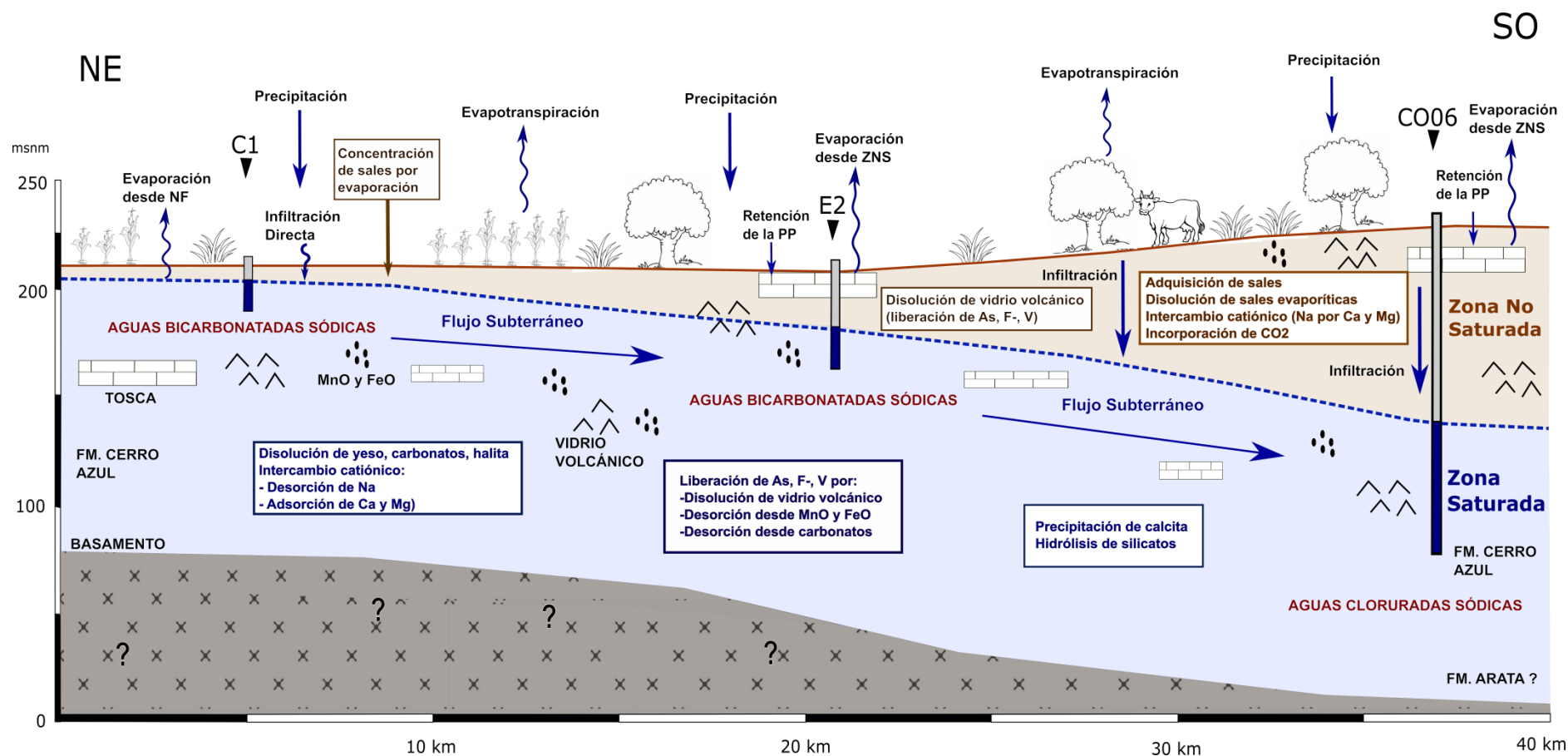


Figura 138. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central (R2) del área de estudio. *Los valores de profundidad de las perforaciones, del basamento y de las formaciones estratigráficas son esquemáticas.

15 CONCLUSIONES

La provincia de La Pampa, incluyendo el área estudiada, presenta una fuerte dependencia del recurso hídrico subterráneo para abastecer demandas hídricas de la población, considerando que carece de otras fuentes de agua en la mayor parte de su territorio. Por ello, al igual que en provincias vecinas, se convierte en un recurso primordial para el desarrollo socioeconómico. El *Acuífero Pampeano* involucra gran parte del país y contribuye un gran porcentaje de la producción nacional, ya que es la base del desarrollo de las actividades ganaderas, agrícolas, industriales, entre otras.

La zona de estudio forma parte de una porción del noreste de la provincia de La Pampa y alcanza a estar influenciada por el factor orográfico hacia el oeste generado por la Cordillera de Los Andes que provoca un bloqueo del aporte de humedad desde el Océano Pacífico, que sumado a la amplia distancia al Océano Atlántico, la zona adquiere características continentales. De igual manera, hacia el este la zona es favorecida por los vientos húmedos y cálidos provenientes del Atlántico, principalmente en época estival debido a la formación del ciclón del NOA. Este efecto puede observarse en el área estudiada a partir del régimen de precipitaciones, las cuales aumentan desde el suroeste al noreste, siendo menor la precipitación media anual en el pueblo de Ingeniero Foster, y mayor en las localidades de Arata y Caleufú. Las precipitaciones anuales han variado en el tiempo presentando un fuerte incremento a partir de la década del '70, sumado a la frecuencia de eventos extremos que han tenido como consecuencias inundaciones y anegamientos.

El clima entonces, se caracteriza por ser subhúmedo a semiárido de oeste a este, por lo que las variaciones interanuales de lluvias intensas a sequías son comunes. Los mayores valores de evapotranspiración potencial son registrados en épocas estivales, mientras que la mayor humedad relativa se registra en invierno. Los vientos presentan una dirección norte y noreste y las velocidades son mayores en los meses de primavera. El balance hídrico de la zona se caracteriza por registrar excesos hídricos principalmente en meses de primavera, siendo los meses de mayor disponibilidad para potenciales recarga al acuífero.

La zona se desplaza regionalmente dentro de la denominada Llanura Chacabonaerense o Chacopampeana. Esta llanura es el resultado de varios ciclos orogénicos antiguos ocurridos, entre ellos la subducción de Pampia con el Cratón del Río de la Plata (Ciclo Pampeano), que generó las Sierras Pampeanas Orientales durante el Proterozoico superior a Cámbrico inferior, cuyas rocas graníticas conforman el basamento cristalino del área de estudio. Estas rocas se encuentran aflorando hacia el norte en Lonco Vaca. Posteriormente entre el Triásico medio al Cretácico medio ocurre un ciclo

extensional (Ciclo Patagónico) que genera una zona de ruptura sobre el margen occidental del cratón del Río de La Plata conocido como el sistema de rift pampeano central, estrechamente ligado a la apertura del Atlántico Sur. Debido a esta situación, se generaron depocentros conformados por depósitos continentales y marinos que afectan la zona de estudio, entre ellos las cuencas de Macachín, Laboulaye, General Lavalle, Quehué, Nueva Galia, entre otros. Ya en el Mioceno medio-tardío ocurre una transgresión marina que colmata las cuencas, cuyos depósitos desarrollan la Formación Macachín. Durante el Mioceno tardío se depositan los sedimentos loésicos de la Formación Cerro Azul, que se encuentran fuertemente cementados hacia el techo y rematando en la denominada tosca. Finalmente, durante el Pleistoceno y Holoceno se depositan en la llanura un manto de limos arenosos de origen eólico de importantes potencias conformando la Formación Junín.

En el área de estudio el basamento se encuentra afectado fuertemente por un sistema de fallas generado por los continuos ciclos ocurridos y la formación del sistema de rift pampeano y sus consecuentes depocentros. Numerosos autores a partir de estudios gravimétricos han planteado que en la zona de estudio las cuencas se conectan entre sí, entre ellas la de Quehué, con la cuenca de Nueva Galia al norte y la de Laboulaye al oeste. Este basamento, a su vez, se encuentra afectado durante el Mioceno tardío por el levantamiento del Bloque Pampeano Central que está ligeramente inclinado hacia el este y no registra depósitos de transgresión marina.

A partir de distintos autores y sumado a la prospección geofísica realizada en la zona de estudio se obtuvieron valores resistivos asignados a la respuesta eléctrica del basamento que se detectan a menor profundidad en la localidad de Arata variando entre los 230 y 250 m, profundizándose hacia el oeste hasta los 350 m en el pueblo Pichi Huinca. Kostadinoff y Llambías (2002) postulan una posible extensión de la Cuenca de Laboulaye en esta zona de la provincia que, posteriormente en el Mioceno tardío, el basamento se eleva debido al levantamiento del Bloque de La Pampa Central según Folguera y Zarate (2009). Mientras que, hacia la zona de Ingeniero Foster y La Maruja el basamento se profundiza y no es detectado con prospección geofísica pero por antecedentes se sabe que en esta última localidad se encuentra a 700 m. Kostadinoff *et al.* (2006) plantea en este sector una posible extensión de la cuenca de Nueva Galia conectándose con la de Laboulaye al este.

Estratigráficamente, posterior al basamento se apoya la Formación Arata de edad permotriásica, que se encuentra en la zona de Arata y detectada también hacia el este en Metileo, caracterizada por areniscas finas a medias con yeso e intercalaciones arcillosas. Suprayace la Formación Abramo de edad cretácica, caracterizada por limolitas arenosas con intercalaciones de arcillas. Posteriormente se deposita la Formación Macachín, originada por la

transgresión marina de edad oligo-miocena y conformada por limos, arenas e intercalaciones arcillosas con un alto contenido de yeso. Por encima suprayace la Formación Cerro Azul, la más importante hidrogeológicamente, correspondiente al Mioceno superior, constituida por material loésico, limos arenosos con intercalaciones de arcillas, con un importante espesor y una tosca calcárea en los niveles superiores que puede aflorar en algunas zonas. Presenta también sedimentos volcanoclásticos provenientes de erupciones Andinas, conformado por vidrio volcánico, nódulos y cementación calcárea y óxidos de manganeso y hierro en forma de moteados. En esta formación se encuentra el principal reservorio de agua subterránea, cuyos sedimentos de origen volcánico aportan elementos al agua como el fluoruro y el arsénico. Por último, se deposita la Formación Junín del Holoceno conformada por arenas limosas de origen eólico, desarrollándose en el área de estudio como sectores médanos, que hidrogeológicamente, forman potenciales zonas de recarga del Acuífero Pampeano. Mineralógicamente, los sedimentos loésicos de la Formación Cerro Azul tienen una composición andesítica-dacítica, presentan principalmente minerales de cuarzo, feldespatos potásicos, calcita, andesina, vidrio volcánico y arcillas como la montmorillonita.

La topografía de la región desciende desde el oeste hacia el este, con gradientes muy bajos que no permiten definir redes de drenaje. La extensa área de llanura permite que predominen mayormente los movimientos verticales tales como la evapotranspiración y la infiltración, por sobre los horizontales como el escurrimiento. Además, la región estudiada está conformada por dunas longitudinales compuestas del Pleistoceno y Holoceno con sedimentos arenosos de la Formación Junín, conformando zonas de recarga preferencial en el área de estudio. Dichas acumulaciones arenosas se observan principalmente hacia el oeste en la Región Hídrica de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1), mientras que hacia el este, en la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central (R2), predomina mayormente la presencia de la costra calcárea tosca.

Esta característica de llanura permite que en sectores deprimidos o cubetas de deflación, se formen lagunas de carácter temporario y permanente. Las temporarias surgen en épocas húmedas por la acumulación de excesos hídricos posterior a precipitaciones intensas, que en ocasiones, la tosca dificulta la infiltración, como también, por el ascenso del nivel freático, aumentando así la cantidad de cuerpos de agua superficial y su extensión areal, ocurriendo lo contrario en períodos secos. Estas últimas conforman zonas de descarga locales y pueden contener una alta salinidad. La mayor cantidad de lagunas se ubican en la región R2. Aquellas de carácter permanente actúan como zonas de descarga regional del sistema subterráneo, como la laguna Chadilauquen o las de Monte Nieves y presentan altos

contenidos salinos. En la región R1, sólo se generan lagunas temporarias intermedanales, generadas por excesos hídricos.

Hidrogeológicamente el área presenta características distintas respecto a la profundidad del nivel freático, debido posiblemente a un control de tipo estructural, considerando las grandes variaciones de profundidad que presenta el basamento. Hacia el oeste en la región R1, los niveles freáticos son de mayor profundidad y varían entre los 50 y 120 metros coincidiendo con la profundización del basamento hacia la zona de Ingeniero Foster y La Maruja, siendo menores en las zonas de médanos anteriormente mencionados y hacia el límite con la región vecina al este. La región R1, por su parte, presenta niveles más someros que varían entre los 2 y 35 metros de profundidad, con algunas zonas puntuales que alcanzan los 90 metros como sería la zona de la localidad de Conhelo, probablemente también controlado por la profundización del basamento. El medio de circulación del agua subterránea es preferentemente la Formación Cerro Azul, con características de acuífero-acuitardo.

El área de estudio conforma en general una zona de conducción o transición del flujo subterráneo regional, cuyo movimiento del agua subterránea es desde el extremo oeste hacia el este con gradientes hidráulicos que disminuyen, presentando zonas de recarga y descarga local determinadas por zonas de médanos y depresiones respectivamente. Si bien el flujo regional es coincidente con la topografía, los flujos locales que se observan no lo son, presentando una mayor variabilidad, que probablemente se encuentren bajo un control estructural por la variación en la profundidad del basamento. Los mayores potenciales hidráulicos del área se ubican en la zona de médanos ubicada en el suroeste y en una franja noreste desde el norte de la localidad de Eduardo Castex hacia Arata y Caleufú. El flujo local se moviliza hacia dos puntos principales, uno hacia el noroeste donde también se encuentra la mayor profundización del basamento y de los niveles freáticos en la zona de La Maruja e Ingeniero Foster y otro hacia el sur en la localidad de Conhelo, cuyos niveles también presentan una profundización brusca. El flujo regional, en cambio, se moviliza hacia el este y presenta zonas de descarga local como lo serían las lagunas de Chadilauquen y de Monte Nieves.

En las zonas de niveles freáticos someros, estos presentan fluctuaciones en el tiempo con una rápida respuesta ante el régimen de precipitaciones. Cuanto más somero se encuentre el nivel freático, más inmediata será la respuesta ante una variación en las precipitaciones. En cambio, a medida que se profundizan los niveles la respuesta comienza a presentar un mayor retraso. Conociendo este comportamiento del nivel freático ante las precipitaciones y aplicando varios métodos de recarga (balance hídrico y análisis de fluctuaciones del nivel freático) en la zona de Ingeniero Luiggi en un período

extenso (1998-2017), se constata una recarga media anual de 54 mm, que aumenta en los años de mayores registros pluviométricos y descende en los de menores. Aplicando el método balance del ion cloruro en la zona de Arata se obtuvo una recarga de 11 mm/año pero correspondiente a un período muy corto (2018-2022), que puede deberse a las reducidas precipitaciones y años de sequía que abarca el período analizado. Esto conlleva a la necesidad de actualizar dicho valor a medida que se cuente con más datos de cloruros en la zona.

El agua subterránea presentó una salinidad muy variable en toda la zona, con tendencia a un mayor contenido iónico hacia las zonas de descarga local y menor hacia las de recarga. Por sus características medanosas, las áreas de menor salinidad son aquellas de mayor potencial hidráulico ubicadas al suroeste en la región R1 que se comportan como zonas de recarga local al acuífero. La salinidad se incrementa a medida que las líneas de flujo se movilizan hacia los menores potenciales al noroeste. En la parte central también se observan zonas de recarga local en áreas de médanos, cuyo flujo se moviliza hacia el sur generando una segunda zona de descarga local en Conhelo, cuya salinidad aumenta. En el área de la región R2 donde el potencial hidráulico se encuentra elevado, presenta una salinidad relativamente baja con algunas excepciones puntuales de mayores valores, probablemente por una mayor profundidad de las obras de captación como podría ser en el caso del pozo AR08, por un cambio de litología (arcilla) como es en el caso del pozo LH03 o por la influencia de una zona de descarga local (laguna) como es la situación del pozo E1.

El acuífero estudiado se caracterizó por presentar una hidroquímica muy variable con respecto al contenido aniónico, mientras que el único catión dominante en toda la zona es el sodio. Predominan dos tipos de agua principalmente, por un lado las del tipo bicarbonatadas sódicas preferentemente en las zonas de potenciales hidráulicos más elevados, incluyendo las zonas de médanos de la región R1 y pozos someros de la región R2 y por otro lado, las aguas del tipo cloruradas sódicas hacia zonas de potenciales hidráulicos más profundos, como serían al noroeste del área y hacia Conhelo, cuyos niveles se profundizan al igual que el basamento cristalino. Se destacan además muestras con una mayor concentración de sulfato, destacando la zona de mayor altura piezométrica en el extremo suroeste de la R1 que si bien no se cuenta con la descripción litológica de estas perforaciones, pero considerando que son pozos profundos, podría atribuirse al contenido de yeso que contienen en algunos de sus estratos más profundos la Formación Cerro Azul, como también la Formación Macachín dado a su origen marino.

Esta variabilidad química en la zona de trabajo permite anticipar que son variados los procesos hidrogeoquímicos que suceden durante el tránsito del flujo subterráneo. Algunos de los procesos que ocurren incluyen la disolución de halita, yeso y carbonatos por los cuales se adquieren las concentraciones de cloruro, sulfato y bicarbonato. Sin embargo, las relaciones iónicas indican un exceso de sodio y remoción de calcio en la solución, que estaría dado por un intercambio de bases de ablandamiento. Es decir, desorción de sodio a la solución y adsorción de calcio a la fase sólida. A su vez, esta remoción de calcio podría estar dada por la precipitación de calcita, hipótesis sostenida por una condición de sobresaturación en el índice de saturación de este mineral en al menos un 60% de las muestras. La disolución de yeso también estaría apoyada por la condición de subsaturación del 100% de las muestras respecto al índice de saturación de este mineral. Respecto a los minerales silicatados, el agua subterránea se encuentra en equilibrio con minerales arcillosos del grupo de los feldespatos potásicos, caolinitas y montmorillonitas sódicas y cálcicas. El grupo de las caolinitas y montmorillonitas pueden provenir de la hidrólisis de feldespatos y, considerando que un 50% de las muestras en la relación $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ arrojó valores que no permitían confirmar procesos ni de disolución de carbonatos y ni de hidrólisis de silicatos, no se descarta la posibilidad de que dicho proceso ocurra. Los sedimentos del área de estudio han presentado un importante contenido de montmorillonita como también cantidades de feldespatos, principalmente de andesina. En conjunto con lo planteado, estos grupos de arcillas (caolinita, montmorillonita, entre otros) se destacan como intercambiadores de iones, verificando la posibilidad de que ocurra el proceso de intercambio catiónico en la solución.

La composición isotópica de ^{18}O y ^2H de las precipitaciones de la localidad de Arata y de Santa Rosa permitieron realizar una línea meteórica regional, la cual obedece a la relación lineal tipo de las precipitaciones de cualquier lugar, determinada por la ecuación $\delta^2\text{H}\text{‰} = 7,79 \delta^{18}\text{O}\text{‰} + 12,09$. A partir de la utilización de la recta meteórica regional y la composición isotópica del agua subterránea, se determinaron grupos con distintos comportamientos dentro del área. Un grupo de muestras que indicaron infiltración directa y mantuvieron similar composición isotópica que las precipitaciones compuesto por pozos someros donde la precipitación alcanza el nivel piezométrico (NP) rápidamente y pozos profundos de la región R1 ($25\text{m} < \text{NP} < 75\text{m}$) que por ubicarse en zonas de médanos presentan una rápida infiltración del agua de lluvia. A su vez, la mayoría de las muestras son bicarbonatadas sódicas o bicarbonatadas/sulfatadas sódicas, tipos de aguas característicos de zonas de recarga preferencial. Otro grupo de muestras enriquecidas conformó una línea de evaporación ($\delta^2\text{H}\text{‰} = 3,7 \delta^{18}\text{O}\text{‰} - 9,7$) constituida por dos muestras de pozos muy someros, indicando un proceso de evaporación directa desde la freática y tres muestras cuyo nivel freático se encuentra entre los 21 y 40 metros de profundidad pero presentan procesos de evaporación desde la zona

no saturada (ZNS) debido a la retención de la infiltración generada por la tosca, característico de la región. Estas aguas tienden a ser mayormente mixtas sódicas. Por último, se halla un grupo de muestras pertenecientes a la región R1, extraídas en su totalidad de pozos profundos ($55\text{m} < \text{NP} < 122\text{m}$), que generan una línea de evaporación ($\delta^2\text{H}\text{‰} = 3,7$ $\delta^{18}\text{O}\text{‰} -16,8$), atribuida a procesos de evaporación previos a la infiltración o desde la zona no saturada (ZNS) debido a la presencia de sedimentos más finos y también, a la presencia de tosca en superficie o a poca profundidad que retrasa la infiltración y favorece la evaporación. Estas aguas son en su mayoría muy evolucionadas, del tipo clorurada sódica y mixta sódica.

Respecto al contenido de oligoelementos de la zona, se detectaron en 30 muestras valores elevados de estroncio y vanadio con una media de 850 y 780 $\mu\text{g/L}$. En tanto que los elementos molibdeno, bario y zinc también se encontraron en concentraciones elevadas pero en un orden menor, alcanzando los 63, 39 y 51 $\mu\text{g/L}$ respectivamente. Estas concentraciones son similares a las halladas por otros autores como Ceballo (2020) y Smedley *et al.* (2000).

Por otro lado, dos de los elementos más problemáticos de la zona por sus concentraciones elevadas son el arsénico y el fluoruro, atribuido a la disolución de vidrio volcánico proveniente de la Formación Cerro Azul. Estos presentaron una media en la región analizada de 233 $\mu\text{g/L}$ y 5 mg/L con máximos que alcanzaron los 790 $\mu\text{g/L}$ y 17 mg/L , respectivamente. En general, se observa una menor concentración de estos dos elementos en la región R1 que podría estar influenciado por la presencia de médanos de la Formación Junín. Las variaciones de las concentraciones de estos elementos en el tiempo se mantienen relativamente constantes y elevadas en todas las muestras correspondientes a las perforaciones de abastecimiento de las localidades de la zona.

Respecto al análisis de especiación de As, coincidiendo con lo obtenido por autores anteriores (Smedley *et al.*, 2000, 2002; Aullón Alcaine, 2013), el As^{5+} resultó ser el de mayor predominancia en la totalidad de la zona dejando un promedio en el área de 322 $\mu\text{g/L}$ del total de las muestras. Dicho resultado era esperable debido al carácter oxidante de las aguas subterráneas, cuyas concentraciones de oxígeno disuelto varían entre 4,7 y 6,3 mg/L (UNLPam, 2015). El As^{3+} , fue detectable solo en dos muestras, en Caleufú registrando un valor de 5 $\mu\text{g/L}$ y en la perforación de Pichi Huinca alcanzando el valor más elevado de 40 $\mu\text{g/L}$, representando un 8% y 11% del total de As en cada caso respectivamente. En cuanto a los compuestos orgánicos solo se detectaron en estas dos localidades con concentraciones de 6 y 28 $\mu\text{g/L}$ de DMA (ácido dimetil-arsínico) y 7 y 29 $\mu\text{g/L}$ de MMA (ácidos monometil-arsónico) en Caleufú y Pichi Huinca, respectivamente. Si bien su presencia no puede explicarse con la información obtenida en esta tesis, cabe mencionar que se conoce la

existencia de microorganismos (bacterias y hongos) capaces de obtener energía a partir de la reducción de As^{5+} a As^{3+} , acompañada de una biometilación con generación de MMA y DMA (Diorio *et al.*, 1995).

En el análisis de correlación lineal entre los elementos traza analizados, se obtuvo una mayor relación entre el vanadio y el fluoruro y entre el vanadio y el arsénico con valores de 0,715 y 0,627 respectivamente. Resultados similares han sido también registrados por estudios realizados en la provincia de Córdoba (Nicolli *et al.*, 1989; Blarasin *et al.*, 2014) y por Ceballo (2020) en el noreste de La Pampa. La relación entre el fluoruro y el arsénico fue de 0,574, mientras que la relación entre estos dos elementos y el bicarbonato fue de 0,697 y 0,458 respectivamente. El vanadio también tuvo una relación relativamente alta con el bicarbonato, de 0,542, al igual que con el pH, con un valor de 0,627. Según Mariño (2003), la disolución del vidrio volcánico de la Formación Cerro Azul aporta, además de fluoruro y arsénico, sodio, sílice, potasio, vanadio, entre otros.

El *Acuífero Pampeano* presenta en toda la región concentraciones de arsénico elevadas, que limitan su uso como fuente de consumo humano principalmente. El origen principal de arsénico son las trizas de vidrio volcánico presentes en el material loésico de la Formación Cerro Azul (Nicolli *et al.* 1989). Algunos de los principales procesos por el cual se libera arsénico confirmado por varios autores (Smedley *et al.* 2005, Borzi *et al.* 2015, Dietrich *et al.* 2016), es a partir de la disolución de los vidrios volcánicos, la desorción desde los óxidos e hidróxidos de hierro y la liberación a partir de la disolución de la calcita presente en los horizontes petrocálcicos. Este último conocido normalmente como tosca, se encuentra intercalada dentro de la formación loésica y se expande en gran parte de la provincia de La Pampa, incluyendo en la totalidad del área de estudio exceptuando algunas zonas de médanos, principalmente de la región R1, variando su profundidad y espesor. Este material tendría la capacidad de retener As a través de mecanismos como la coprecipitación y la adsorción. En la movilización del arsénico, principalmente en los procesos de adsorción-desorción, intervienen en orden decreciente de capacidad de adsorción, los óxidos e hidróxidos de hierro, de manganeso y de aluminio principalmente (INTI, 2009).

Para conocer las fases portadoras de arsénico en el área de estudio se realizaron procedimientos de extracción secuencial (PES) aplicado a sedimentos extraídos de una perforación de estudio de la localidad de Arata, con alto contenido de carbonatos, óxidos e hidróxidos de hierro y de manganeso. Como resultado, se obtuvo que las fases que más arsénico portaron fueron los carbonatos y óxidos de manganeso con un porcentaje que varió entre un 42% y 54% del arsénico total extraído. Considerando el porcentaje alto de carbonatos y óxidos que presentan las muestras, era de

esperarse que esta fase sea la de mayor aporte de arsénico. Comparado con Cacciabue *et al.* (2016), en su caso este paso no generó elevados porcentajes, pero destaca que los carbonatos de la muestra estudiada eran bajos. El As coprecipitado con óxidos e hidróxidos de Fe y Mn amorfos y óxidos de Fe bien cristalizados fue la segunda fase de mayor aporte, cuyos porcentajes oscilaron entre un 18% y 25% respecto del total de As extraído. Según Cacciabue *et al.* (2016), los oxi-hidróxidos con un mayor grado de cristalinidad son los que mayor contenido de As contienen. Este paso también coincide con la mayor extracción de Fe y Mn de las muestras, lo que es de esperarse considerando que las muestras tienen en general un contenido elevado de óxidos e hidróxidos de estos elementos.

La calidad de agua para consumo humano fue determinada como no apta en todas las muestras analizadas según el Código Alimentario Argentino y lo reglamentado por la Organización Mundial de la Salud, tanto las extraídas durante las campañas de muestreo como aquellas muestras correspondientes a las perforaciones de abastecimiento de las localidades que abarca el área. El agua se encuentra limitada principalmente por las concentraciones elevadas de arsénico y fluoruro, seguido por el residuo seco y el ion sulfato. A su vez se registraron muestras excedidas en molibdeno, hierro y aluminio. No hubo diferencias significativas entre la calidad de agua de las dos regiones involucradas. La mayoría de las localidades del noreste de la provincia cuentan con una provisión de agua a través de una red de distribución asociada a una planta de ósmosis inversa para lograr disminuir los tenores de los elementos excedidos. Esto es de suma importancia, para evitar perjuicios en la salud de la comunidad.

El contenido de sales del área de estudio fue clasificado como “buena” y “muy buena” para cría de ganado bovino, representando un 89% del total de muestras analizadas. Estas categorías indican un contenido de sales adecuado para cubrir las necesidades minerales que las pasturas no brindan, favoreciendo la producción ganadera, siendo esta una de las principales actividades productivas de la región. Sólo un 10% de las muestras fueron clasificadas como “deficiente”, por lo que se recomienda que sean complementadas con sales minerales para alcanzar los requisitos del ganado. Respecto a la calidad para riego, la mayoría de las muestras presentaron un peligro de sodificación y salinización del suelo entre muy alto y alto, por lo que su uso para tal actividad no es recomendado, y en caso de ser utilizada, se deben emplear técnicas de lavados de suelo, cultivos tolerantes a la salinidad, aplicación de yeso, entre otras.

Finalmente, a partir de todos los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta tesis, se logra presentar un modelo conceptual para cada una de las regiones, junto a los principales procesos hidrogeoquímicos que ocurren

durante la circulación del agua dentro del sistema. La Región Hídrica de la Planicie Longitudinal con Bajos Medanosos (R1) resulta ser una zona de características variables que dependen del ambiente geomorfológico y de la profundidad de sus niveles piezométricos. Las zonas de médanos de esta región actúan como sectores de recarga local, donde el agua de precipitación infiltra rápidamente debido a una mayor permeabilidad de los sedimentos, por lo que el agua en estos sectores es de menor salinidad y del tipo bicarbonatada sódica en general. Los sectores cuyos niveles piezométricos se profundizan actúan como zonas de descarga local, y el agua subterránea es del tipo clorurada sódica. En estos sectores el agua de precipitación infiltra lentamente debido a la retención generada por la costra calcárea cercana a la superficie, por lo que el agua atraviesa un proceso de evaporación previo a la infiltración. Además, la extensa zona no saturada permite que el tiempo de contacto con los sedimentos sea mayor, lo que provoca una mayor adquisición de sales. Por su parte, la Región Hídrica de la Planicie Pampeana Central (R2) se caracterizó por presentar una variación en sus características hidrogeológicas sostenidas principalmente por la variación de los niveles piezométricos. Presenta sectores que actúan como zonas de recarga donde los niveles se encuentran casi en superficie y sus aguas son principalmente bicarbonatadas sódicas, y debido a la limitada zona no saturada, la precipitación se infiltra y alcanza el acuífero rápidamente. Esta aproximación genera zonas cuyas aguas presentan evaporación directa desde el nivel freático. Al igual que la región anterior, algunos sectores actúan como zonas de descarga debido a la profundidad que alcanzan los niveles piezométricos, siendo sus aguas más evolucionadas. En estos sectores, la tosca también presenta un papel importante generando una retención del agua de precipitación en superficie (o cercana a la superficie), por lo que se evaporaría previo a infiltrarse y alcanzar el acuífero. Hacia el este de la región, se encuentra un sistema de lagunas que actúan también como zonas de descarga local, como sería el caso de las lagunas de Monte Nievas y la de Chadilauquen principalmente.

En ambos modelos cabe destacar la importancia que presenta la tosca en el ciclo hidrológico, al generar retención del agua en superficie (o cercana a la superficie) provocando la evaporación del agua de precipitación previo a la infiltración. Además está involucrada en procesos hidrogeoquímicos como la liberación de arsénico al agua subterránea. Por otra parte, en ambas regiones se destaca la deficiencia de calcio que presentan las aguas, postulando como principal proceso removedor al intercambio catiónico, como también a la posible precipitación de calcita. No se descarta la posibilidad de que exista también una hidrólisis de silicatos. También se propone en toda el área de investigación la ocurrencia de la liberación de arsénico, fluoruro y otros oligoelementos al acuífero, a partir de la disolución de vidrio volcánico y desorción y disolución de óxidos e hidróxidos de Mn y Fe, y carbonatos.

Esta tesis permitió conocer e interpretar la hidrogeología de un pequeño sector de características muy dinámicas del *Acuífero Pampeano*, confirmando así que las características químicas del agua subterránea son producto de la interacción del sustrato en el cual se encuentra, y su tiempo de contacto y de residencia. La información hidrogeológica generada y el estudio del comportamiento del arsénico en el acuífero, constituyen un aspecto técnico relevante y de utilidad para la planificación y gestión del recurso hídrico subterráneo de la región.

16 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.P.H.A, A.W.W.A. y W.P.C.F. 1992. Standard methods for the examination of water and waste water, 18ª ed., 1134 p, Washington.
- Administración Provincial del Agua. 2015. Datos Históricos de Lluvia. <http://www.apa.lapampa.gov.ar/metereologias/19-meteorologia/42-datos-historicos-de-lluvia.html>. Ministerio de Obras y Servicios Públicos, Gobierno de La Pampa. Consultada el 06 de Julio de 2016.
- Allen, R., Burman, R., & Jensen, M. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. New York: American Society of Civil Engineers.
- Allen, R., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56. Rome, Italy.
- Ameghino, F. 1884. Las secas y las inundaciones en la Provincia de Buenos Aires, Obras de retención y no desagüe. Reedición 1984. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Naturales y Museo.
- Appelo, C. y Postma, D. 1993. Geochemistry, Groundwater and Pollution. A.A. Balkema Pub., 536 p, Rotterdam. ISBN 90 5410 105 9.
- Arigós. L. E. 1969. Informe técnico hidrogeológico de la provincia de La Pampa. Inf. Inéd., 70 pp. Min. De Econ. Y O. Públicas. Santa Rosa.
- Arroyo, C. C. y Mariño, E. E. 2006. Estimación de la recarga del acuífero que abastece a la localidad de Quemú Quemú, La Pampa, Argentina. VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea (Versión en CD). Asunción, Paraguay.
- Aullón Alcaine, A. 2013. Distribution and Mobility of Arsenic in the Shallow Aquifers of Northeastern of La Pampa Province, Argentine. TRITA LWR Degree Project 13:34.
- Aullón Alcaine, A., Schulz, C., Bundschuh, J., Jacks, G., Thunvik, R., Gustafsson, J.P., Mörtz, C. M., Sracek, O., Ahmad, A. y Bhattacharya, P. 2020. Hydrogeochemical controls on the mobility of arsenic, fluoride and other geogenic co-contaminants in the shallow aquifers of northeastern La Pampa Province in Argentina. Science of the Total Environment 715: 136671.
- Barredo, S. y Stinco, L. 2010. Geodinámica de las cuencas sedimentarias: su importancia en la localización de sistemas petroleros en la Argentina. Petrotecnia, abril, 2010.
- Barros, V., Doyle, M. E. y Camilloni, I. A. 2008: Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. Theor. Appl. Climatol., 93, 19–33.
- Barros, V. y Camilloni, I. 2016. La Argentina y el cambio climático, de la física a la política. Eudeba, 286 pp.
- Barros y Perczyk. 2006. República Argentina: Vulnerabilidad a Cambios Climáticos e Hidrológicos. Buenos Aires, Argentina: Instituto Torcuato Di Tella; Secretaría de ambiente y desarrollo Sustentable de la Nación.

- Bavera, G. A. 2001. Manual de Aguas y Aguadas para el ganado. Ed. Hemisferio Sur S.A., 387 p.
- Bhattacharya, P., Claesson, M., Bundschuh, J., Sracek, O., Fagerberg, J., Jacks, G., Martin, R. A., Storniolo, A. R. y Thir, J. M. 2006. Distribution and mobility of arsenic in the Río Dulce Alluvial aquifers in Santiago del Estero Province, Argentina. *Science of the Total Environment* 358(1-3): 97-120.
- Bettoschi, A., Marrucci, A., Marras, B., Atzori, m, Schintu, M. 2018. Arsenic speciation in marine sediments: a comparison between two sequential extraction procedures. – *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 27(8): 723-735. DOI: 10.1080/15320383.2018.1512081
- Bianchi, A. R y Cravero, S. A. C. 2010. Atlas climático digital de la República Argentina. Salta: Ediciones Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria. 84 p. ISBN 978- 987-1623-95-2. <http://inta.gob.ar/documentos/atlas-climatico-digital-de-la-republica-argentina-1/>.
- Bisceglia, H. A. 1980. Diseño y ubicación de Pozo de Explotación de Rucanelo. Administración Provincial del Agua, Santa Rosa (Inédito).
- Blarasin, M. 2003. Geohidrología ambiental del Sur de Córdoba, con énfasis en la ciudad de Río Cuarto y su entorno rural. Tesis Doctoral. UNRC (inédita). 370 p. Río Cuarto, Córdoba.
- Blarasin, m, Cabrera, A. y Matteoda, E. 2014. Aguas subterráneas de la Provincia de Córdoba. 1a ed. - Río Cuarto- UniRío Editora. E-Book ISBN 978-987-688-091-6.
- Bocanegra, O., Bocanegra, E. y Alvarez, A. 2002. Arsénico en aguas subterráneas: su impacto en la salud. *Groundwater and human development*. Bocanegra, E., Martinez, D. Massone, H. (Eds.) 2002-ISBN 987-544-063-9 209
- Bohn, V. Y., Piccolo, M. C. y Perillo, G. M. E. 2007. Aplicación del Índice estandarizado de precipitación a la Laguna Unamuno. *GEOACTA* 32, 75-81. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. ISSN 0326-7237.
- Bonorino, A. G., Limbozzi, F., Albouy, R. y Lexow, C. 2008. Movilidad de metales y otros elementos en el acuífero loésico regional del suroeste bonaerense. *Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. Geoacta* 33: 31-42 p.
- Borzi, G. E., García, L. y Carol, E. S. 2015. Geochemical processes regulating F^- , as and NO_3^- content in the groundwater of a sector of the Pampean Region, Argentina. *Science of The Total Environment* 530: 154-162.
- Brescia, V., Lema, D. y Parellada, G. 1998. El fenómeno ENSO y la agricultura pampeana: impactos económicos en trigo, maíz, girasol y soja. Documento de Trabajo N° 1. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 28 p.
- Brouwer, O. F., Onkenhout, W., Edelbroek, P. m, de Kom, J. F., de Wolff, F. A. y Peters, A. C. 1992. Increased neurotoxicity of arsenic in methylenetetrahydrofolate reductase deficiency. *Clinical Neurology and Neurosurgery* 94(4): 307-310.

- Bundschuh, J., García, M. E., Birkle, P., Cumbal, L. H., Bhattacharya, P. y Matchullat, J. 2009. Occurrence, health effects and remediation of arsenic in groundwaters of Latin America. En: Natural arsenic in groundwater of *Latin America*. In: Natural arsenic in groundwaters of Latin America. Arsenic in the Environment, 1. Bundschuh, J., Armienta, M. A., Birkle, P., Bhattacharya, P., Matschullat, J. y Mukherjee, A. B. (eds.) Taylor & Francis (CRC Press), London, United Kingdom, pp. 3-15.
- Bundschuh, J., Nath, B., Bhattacharya, P., Liu, C., Armienta, M. A., Moreno López, M. V., Lopez, D. L., Jean, J. S., Cornejo, L., Lauer Macedo, L. F., Tenuta Filho, A. 2012. Arsenic in the human food chain: the Latin American perspective. *Science of the Total Environment* 429 (2012) 92–106.
- Bundschuh, J., Nicolli, N. H., Blanco, M. C., Blarasin, M., Farías, S. S., Cumbal, L., Cornejo, L., Acarapi, J., Lienqueo, H., Arenas, M., Guérèquiz, R., Bhattacharya, P., García, M. E., Quintanilla, J., Deschamps, E., Viola, Z., Castro de Esparza, M. L., Rodríguez, J., Pérez Carrera, A. y Fernández Cirelli, A. 2008b. Distribución de arsénico en la región sudamericana. En: *Iberoarsen. Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana*. Bundschuh, J., Pérez Carrera, A. y Litter, M Eds. CYTED. Argentina: 137-186.
- Bundschuh, J., Pérez Carrera, A. y Litter, M. 2008a. *Iberoarsen. Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana*. Bundschuh, J., Pérez Carrera, A. y Litter, M Eds. CYTED. Argentina. 230 pp.
- Buschiazzo, D. E. y Abascal, S. 2001. Informe sobre suelos. Anexo I A. En: *Evaluación de Impacto Ambiental de las obras previstas para mitigar las inundaciones en el noreste de la provincia de La Pampa. Informe Final*. Unidad Ejecutora de Estudios de Impacto Ambiental Universidad Nacional de La Pampa.
- Cabrera, A., Blarasin, M., Cabrera, S., Matteoda, E., Gómez, M. L., Villalba, G., Hildmann, F. y Bettera, A. 2005. Arsénico y Flúor en el acuífero freático en el sur de Córdoba: Línea de Base Hidroquímica y problemática ambiental vinculada. En: *Arsénico en las aguas: Origen, movilidad y tratamiento*. (Galindo, G., Fernández-Turiel, J. M., Parada, D. y Gimeno, D., Eds.). II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea. IV Congreso Hidrogeológico Argentino: 41-52.
- Cabrera, A., Dapeña, C., Blarasin, M., Matteoda, E. and Panarello, H. 2009. Isotopic and geochemical assessment of confined thermal aquifers of Southern Córdoba province, Argentina. *Journal of Environmental Hydrology*, Vol 17, Paper 22, 9 pag. (Electronic journal of the International Association for Environmental Hydrology).<http://www.hydroweb.com/journal-hydrology-2009.html>
- Cacciabue, L., Bea, S., Dietrich, S., Weinzel, P. y Sierra, L. 2016. Identificación de fases portadoras de arsénico y potenciales mecanismos de liberación desde la zona no saturada hacia el acuífero. Calidad del agua subterránea. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario

- Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea, Actas CD, Catamarca.
- Calmels, A. P. 1996. Bosquejo Geomorfológico de La Provincia de La Pampa. UNLPam. Santa Rosa. 110 pp.
- Calmels, A. P, y Casadío, S. 2005. Compilación Geológica de la Provincia de La Pampa. Editorial Amerindia 1°Ed. Santa Rosa, La Pampa, 324 pp.
- Calmels, A. P y Tullio, J. O. 1980. Documentos para el estudio geológico de la provincia de La Pampa. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Facultad de Ciencias Humanas, 185 p, Santa Rosa.
- Camilloni, I. A. 2005. Tendencias climáticas. Cap. 2. En Barros V., Menéndez Á. y Nagy G. Eds.: El cambio climático en el Río del Plata, CONICET: 13-19.
- Camilloni, I. A. 2018. Argentina y el cambio climático. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. Ciencia e Investigación; 68 N°5: 5-10. ISSN: 1132-0974.
- Cano, E., Casagrande G., Conti H. A., Fernandez B., Hevia R., Lea Plaza J. C., Maldonado Pinedo D., Martinez H., Montes M. A. y Peña Zubiarte C. A. 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la provincia de La Pampa. INTA-Gobierno de La Pampa-UNLPam, 493 p, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- Carretero, S. y Kruse, E. 2010. Modificaciones en las áreas de recarga del acuífero freático en los médanos costeros de San Clemente del Tuyú, provincia de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 66(4), 466-474.
- Carrica, J. C. y Lexow, C. 2004. Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del Arroyo Napostá Grande, Argentina. RAGA. 59 (2): 281-290. ISSN 0004-4822.
- Casadío, S., Montalvo, C., Parras, A. y Manera, T. 2000. Paleontología y sedimentología de las sedimentitas continentales del Cretácico superior aflorantes en el sureste de La Pampa. Jornada de Ciencia y Técnica, UNLPam. Trabajos de Investigación, Resúmenes: 66-67, Santa Rosa.
- Casagrande G. A., Vergara, G. T. y Bellini, Y. 2006. Cartas agroclimáticas actuales de temperaturas, heladas y lluvia de la provincia de La Pampa (Argentina). Rev. Fac. Agronomía-UNLPam, Vol. 17 N°1/2. ISSN 0326-6184.
- Castañeda, E. y V. Barros, 1994. Las tendencias de la precipitación en el Cono sur de América al este de los Andes, Meteorológica, 19, 23–32.
- Castro, E. 2008. Análisis hidrogeológico y modelo conceptual del funcionamiento del acuífero de Intendente Alvear, La Pampa, Argentina. Tesis de Maestría en Ciencias Hídricas. Universidad Nacional de La Pampa. 192 pp.
- Castro, E. 2013. Estudio hidrogeológico del acuífero que provee de agua potable a Intendente Alvear. Departamento Chapaleufú-provincia de La Pampa. Tesis Doctoral en Ciencias Geológicas. UNRC. Inédito. 245 pág.
- Castro, E. y Schulz, C. J. 2009. Hidrogeología y Modelo Conceptual del Acuífero Detrítico de Intendente Alvear y Ceballos, La Pampa. Argentina. VI

- Congreso Argentino de Hidrogeología, Vol. CD, R35: 10p. Santa Rosa, La Pampa.
- Castro de Esparza, L. 2009. The presence of arsenic in drinking water in Latin America and its effect on public health. En: Natural arsenic in groundwater of Latin America. Arsenic in the Environment, Volume 1. Bundschuh, J., Armienta, M. A., Birkle, P., Bhattacharya, P., Matschullat, J. y Mukherjee, A. B. (eds.) Taylor & Francis (CRC Press), London, United Kingdom, pp. 17-29.
- Ceballo, L. 2020. Caracterización hidrogeoquímica e isotópica del agua subterránea en sectores medanosos del noreste de la Provincia de La Pampa, Argentina. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Chebotarev, I. I. 1955. Metamorphism of Natural Waters in the Crust of weather. Ingeniero Geochim. Cosmochim. Acta, 8:22-48.
- Chen, C. J., Chen, C. W., Wu, M. M. y Kuo, T. L. 1992. Cancer potential in liver, lung, bladder and kidney due to ingested inorganic arsenic in drinking water. British Journal of Cancer 66(5): 888-892.
- Chernicoff, C. J. y Zappettini, E. O. 2004. Geología Sólida y Delimitación de Terrenos Tectonoestratigráficos en la Region Centro-Austral Argentina: Evidencias Geofísicas. Serie Contribuciones Técnicas; Geofísica nro.11. 27 p. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales
- Código Alimentario Argentino (CAA). 2021. Ley 18284 Decreto Reglamentario 2126/71. Anexo 1. Capítulo XII, Artículos: 982 al 1079 - Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificadas. Actualizado al 10/2019. Disponible en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anmat_caa_capitulo_xii_aguas_actualiz_2021-08.pdf
- Consejo Federal de Inversiones (CFI). 1975. Mapa geológico de la provincia de Buenos Aires. Convenio CFI-MOP M.A.A. Buenos Aires.
- Consejo Federal de Inversiones (CFI). 1985. Estudio de prefactibilidad de esquemas alternativos para el aprovechamiento de los volúmenes de agua excedentes localizados en el área comprendida entre los paralelos 36° y 32° S y los meridianos 62° y 65° O. Tomo I .Franklin Consultora S.A. e Interconsul S.A. Consejo Federal de Inversiones, 200 p, Buenos Aires, Argentina.
- Craig, H. 1961. Isotope variations in meteoric waters. Science, 133: 1702-1703.
- Custodio, E. 1993. Hidrogeoquímica e Isotopía ambiental. Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Bocanegra y Rapaccini (Eds.). Mar del Plata. Pp. 61-78
- Custodio Gimena, E., 1998. Recarga a los acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. Boletín Geológico y Minero, 109 (4): 329- 346.
- Custodio, E. y Llamas, M. 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega. Barcelona. 2 Vol. 1-2350.

- Dalmaso, M. G., Mariño, E. E. y Usunoff, E. J. 2005. Evaluación preliminar de la adsorción de flúor en minerales de acuíferos de La Pampa. IV Congreso Argentino de Hidrogeología, Actas II: 141-149, Río Cuarto.
- Dalmaso, M. G., D. E. Martinez y Mariño, E. E. 1999. Contaminación por efluentes de la industria frigorífica: El caso del acuífero arenoso de General Pico. En A. Tineo (Ed.): Hidrología Subterránea. Serie de Correlación Geológica, 13:187-194.
- Dalmaso, M. G., E. E. Mariño y Malán, J. M. 2000. Calidad del agua subterránea en el área urbana de General Pico, provincia de La Pampa, República Argentina. 1º Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas, Trabajo N° 202, 9 p, Fortaleza.
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. Tellus, 16: 436-468.
- Dapeña, C. 2008. Isótopos Ambientales livianos: su aplicación en hidrología e hidrogeología. Tesis Doctoral en Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias y Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Tesis 4282. 442p.
- Dapeña C., Schulz, C.J., Panarello, H.O., Dornes, P. y Dalmaso, G. 2002. Estudio Isotópico Preliminar del Acuífero del Valle Argentino, provincia de La Pampa, Argentina. XXXII IAH & VI ALHSUD "Groundwater and Human development" Congress , Volume (CD): 1062-1069.
- Dapeña, C. y Panarello, H. 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. 2009. Isótopos ambientales aplicados en la identificación de mecanismos y fuentes de contaminación. En *Actas/Resúmenes, Sección V: Geoquímica Isotópica*. I Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie., p.80. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, Argentina.
- Davis, S. y R. De Wiest, 1971. Hidrogeología. Ed. Ariel. 554 pág.
- Dickinson, J., Land, m, Faunt, C., Leake, S., Reichard, E., Fleming, J. y Pool, D. 2006. Hydrologic framework refinement, ground-water flow and storage, water-chemistry analyses, and water-budget components of the Yuma area, Southwestern Arizona and Southeastern California. Reston, Virginia 2006, Scientific Investigation Report 2006-5135. (En línea), <http://pubs.usgs.gov/sir/2006/5135/>.
- Dirección General de Industria Minera. 1949. Diez años de perforaciones 1926-1935. II Perfiles y datos técnicos. Publicación N° 139. Buenos Aires.
- De Elorriaga, E. E. 1996. Resultados del análisis de datos del subsuelo de la parte noreste de la provincia de La Pampa, Argentina. VI Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales, Actas: 83-93, Santa Rosa.
- De Elorriaga E. E. 2010. Evaluación de los depocentros de la cuenca de Macachín, provincias de La Pampa y Buenos Aires, Argentina. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Sur, departamento de Geología. 269 p.

- De Elorriaga, E. E. y Camilletti, C. M. 1999. La cuenca de Macachín entre Anguil y Catriló, La Pampa, Argentina. 16º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 227-230.
- De Elorriaga, E y Tullio, J. O. 1998. Estructuras del subsuelo y su influencia en la morfología en el norte de la provincia de La Pampa. X Congreso de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica. Actas III: 227-330pp, Buenos Aires.
- De Elorriaga, E., Kostadinoff, J. y Raniolo, L. 2013. Caracterización geofísica de la Cuenca de Quehué, provincia de La Pampa. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 70: 163-172.
- De Ormaechea, J. M. 1972. Estudios de Fuentes Winifreda. Administración Provincial del Agua, Santa Rosa (Inédito).
- De Salvo, E., Cecci, J. y Dillon, A. 1969. Caracteres geológicos de los depósitos eólicos del pleistoceno superior de Junín. Provincia de Buenos Aires. IV Jornadas Geológicas Argentinas. 1: 269-290. Buenos Aires.
- Dietrich, S., Bea, S.A., Weinzettel, P., Torres, E. y Ayora, C. 2016. Occurrence and distribution of arsenic in the sediments of a carbonate-rich unsaturated zone. Environmental Earth Sciences 75(2): 90.
- Dietrich, S., Roa, O., Gualde, M. S., y Weinzettel, P. 2022. Controles hidrogeoquímicos sobre la concentración de arsénico en el acuífero somero de la región pampeana. Revista de la Asociación Geológica Argentina 79 (3): 498-515 (2022).
- Dillon, B., Pombo, D., Martínez Uncal, M. C., Diharce, M. C., Leone Escuredo, D., Palazzo, L., Bossa, J. P y Galea, J. M. 2017. Las áreas inundadas y anegadas en el noreste de la provincia de La Pampa. En: "Áreas anegadas en el Noreste de La Pampa. Estudio mediante el uso de geotecnologías", Proyectos Orientados de Interés Regional (POIRe). Resolución 231/2017, Consejo Superior de la Universidad Nacional de La Pampa. Inédito.
- Diorio, C., Cai, J., Marmor, J., Shinder, R. y DuBow, M. S. 1995. An Escherichia coli chromosomal ars operon homolog is functional in arsenic detoxification and conserved in Gram-negative bacteria. J Bacteriol 177, 2050-2056.
- Dold, B. 2003. Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste. J. Geochem. Explor. 2003, 80, 55–68. DOI:10.1016/S0375-6742(03)00182-1.
- Dornes, P. y Schulz, C. J. 2001. Determinación de la recarga en la región de La Pampa central, Argentina. En A. Medina, J. Carrera y L. Vives (Eds.): Serie Hidrogeoquímica y Aguas Subterráneas, Tomo I, 614-622. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- Escuder R., J. Fraile, S. Jordana, F. Ribera, X. Sánchez-Vila y Vázquez-Suñé, E. (Eds.). 2009. Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona, España.
- FAO. 1993. CropWat. Riego y Drenaje, Nro. 46. 215 p.

- FAO, 2012. ETo Calculator v3.2. Land and Water Digital Media Series N° 36. FAO, Roma, Italia.
- FCIHS. 2009. Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea. Escuder R., Fraile J., Jordana S., Ribera F., Sánchez-Vila X. y Vázquez-Suñé E. (Eds.). Barcelona, España.
- Fisher, R. S. y Mullican, W. F. 1997. Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeol. J.* 5, 4-16.
- Folguera, A. 2011. La reactivación neógena de la Pampa Central. Tesis Doctoral. Biblioteca Digital de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires "Luis Federico Leloir". N° de Tesis: 4970. 199 pp.
- Folguera, A. y Zárate, M. A. 2009. La sedimentación neógena continental en el sector extraandino de argentina central. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64 (4): 692-712.
- Folguera, A. y Zárate, M. A. 2018. La estructuración miocena tardía del Bloque de la Pampa Central. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 75(1), 115-133.
- Freeze, R. A. y Cherry J. A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, 604 p, New Jersey.
- Frenguelli, J. 1955. Loess y limos pampeanos. Fac. de Ciencias Naturales y Museo, Serie Técnica y Didáctica N° 7, 88 p, La Plata.
- Friedman, I. 1953. Deuterium content of natural water and other substances. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 4: 89-103.
- Fritsch, P. y De Saint Blanquat, G. 1985. La contaminación por los nitratos. *Mundo científico*, 5 (52):1172-1181. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, FCIHS. (2009). Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea. Escuder R., Fraile J., Jordana S., Ribera F., Sánchez-Vila X. y Vázquez-Suñé E. (Eds.). Barcelona, España.
- Fuentes, J. y Cruz, J., 1990. Curso elemental de riego. En: Manuales de Capacitación. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.
- Funes Pinter, I., Salomon, M. V., Gil, R., Mastrantonio, L., Bottini, R. y Piccoli, P. 2018. Arsenic and trace elements in soil, water, grapevine and onion in Jáchal, Argentina. *Science of The Total Environment* 615: 1485-1498.
- García de Pedraza, L. y Ruíz Beltrán, L. 1989. La sequía y el clima. Hojas divulgadoras N° 01/89. ISBN 84-341-0626. Rivadeneyra S.A. Madrid, España.
- García Maurizzio, R. F. 2012. Geología de los Recursos Hídricos. Escuela de Geología, Facultad de Cs. Naturales, UNSa. Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Argentino. 1° Edición. Salta, Argentina.
- Garrels, R. M. 1960. Mineral equilibria. Harper and Row, New York, 254 p.
- Garrels, R. M. y Christ, C. L. 1965. Solutions, minerals and equilibria. Ed. Freeman, Cooper y Co, 450 p, San Francisco.

- Gentile, E., Martin, P. y Gatti, I. 2020. Argentina físico-natural: Clima en Argentina. ANIDA. Atlas Nacional Interactivo de Argentina. Instituto Geográfico Nacional. https://static.ign.gob.ar/anida/fasciculos/fasc_clima_arg.pdf
- Giai, S. B. 1997. Rasgos hidrológicos de El Meauco, provincia de La Pampa, con especial referencia a su freaticimetría. Actas I Congreso Nacional de Hidrogeología, Bahía Blanca, 105- 115.
- Giai S. B., Visconti G y Peinetti, H. 2002. La formación de falsas capas freáticas en Eduardo Castex, Provincia de La Pampa. Huellas, N° 7: 18 pp.
- Giraut M., Lupano C., Schulz C. y Rey C. 2006. Cartografía Hídrica Superficial de la provincia de La Pampa. Tercer Congreso de la Ciencia Cartográfica y X Semana Nacional de Cartografía, Buenos Aires.
- Goin, F., C. I. Montalvo y Visconti, G. 2000. Los marsupiales (Mammalia) del Mioceno Superior de la Formación Cerro Azul (provincia de La Pampa, Argentina). Estudios Geológicos, 56 (1-2):101-126.
- Gonfiantini, R. 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature* 271: 534. London.
- Gonfiantini, R. 1999. Investigating the hydrological Cycle with Environmental Isotopes. Conference. *II South American Symposium on Isotope Geology*, Actas: 537-547.
- Gómez, L., Canizo, B., Lana, B., Zalazar, G., Wuilloud, R. y Aravena, R. 2019. Hydrochemical processes, variability and natural background levels of Arsenic in groundwater of northeastern Mendoza, Argentina. *Journal of Iberian Geology* 45: 365-382.
- Guibaldo, C. 2010. Importancia del aporte de Flúor en el agua potable. Tercer Congreso Pampeano del Agua. Compilado por María Gabriela Dalmaso; Carlos Mario Camiletti; Raúl Hernández. - 1a ed. - Santa Rosa: Base 1, 2010. 380 p. ISBN 978-987-22893-9-3.
- Healy, R. W. y Cook, P. G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10: 91-109.
- Hounslow, A. W. 1995. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. CRC Press LLC, Lewis Publishers, Boca Raton.
- INTI. 2009. Modelo de Intervención para el Abatimiento de Arsénico en Aguas de Consumo. Química: Centro de Información y Desarrollo en Química. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Informe Mayo 2009.
- IPCC. 2013. Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Irigoyen, M. 1975. Geología del subsuelo y plataforma continental. VI Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 139-168, Buenos Aires.

- Jensen, R., Marazzi, m., Savioli, J., Brea, J. y Tavecchio, H. 2000. Diagnóstico de inundación en la región noreste de la Provincia de La Pampa, Argentina. Gobierno de la Provincia de La Pampa.
- Kanematsu, M., Young, T. M., Fukushima, K., Green, P. G. y Darby, J. L. 2010. Extended Triple Layer Modeling of Arsenate and Phosphate Adsorption on a Goethite-based Granular Porous Adsorbent. *Environmental Science & Technology*, 44, 3388–3394.
- Keon, N. E., Swartz, C. H., Brabander, D. J., Harvey, C., Hemond, H. F. 2001. Validation of an Arsenic Sequential Extraction Method for Evaluating Mobility in Sediments. *Environmental Science & Technology*, 35 (16). 3396 DOI:10.1021/es0111028.
- Kuhn A. y Sigg L. 1993. Arsenic cycling in eutrophic Lake Greifen, Switzerland: influence of seasonal redox processes. *Limnol. Oceanogr.* 38, 1052–1059.
- Kostadinoff, J., Llambías, E., Raniolo, A. y Álvarez, G. 2001. Interpretación geológica de los datos geofísicos del sector oriental de la provincia de La Pampa. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 481-493pp.
- Kostadinoff, J y Llambías, E. 2002. Cuencas sedimentarias en el subsuelo de la provincia de La Pampa. V Congreso de exploración y desarrollo de hidrocarburos. Mar del Plata, CD 9 pp.
- Kostadinoff, J., Gregori, D., Raniolo, A. López, V. y Strazzere, L. 2006. Configuración geológica-geofísica del sector sur de la provincia de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61 (2): 279-285.
- Kottek, m, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, y Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- Kruse, E., Forte Lay J. A. y Aiello J. L. 2006. Water table fluctuations: an indicator of hydrologic behavior in the Northwest region of Buenos Aires Province (Argentina). *Hydrological Sciences*. Vol. 302 p. 91 – 91. ISSN 0144-7815.
- Kruse, E. y Zimmermann, E. 2002. Hidrogeología de Grandes Llanuras. Particularidades en la Llanura Pampeana (Argentina). Workshop Groundwater and Human Development. Mar del Plata (Argentina). XXXII IAH Congress: 2025-2038.
- Laurencena, P., Varela, L. y Kruse, E. 1999. Variación de la recarga subterránea. Cuenca Arroyo El Pescado (provincia de Buenos Aires). VII Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales, Actas: 183-192, Santa Rosa.
- Laurencena, P., Varela, L., Kruse, E., Rojo, A. y Deluchi, M. 2002. Características de las variaciones freáticas en un área del noroeste de la Provincia de Buenos Aires. En: *Groundwater and Human Development*, Bocanegra, E., Martínez, D., Massone, H. (Eds).
- Lerner, D. N., Issar, A. S., y Simmers, I. 1990. Groundwater recharge—A guide to understanding and estimating natural recharge: International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology, v. 8, 147 p.

- Linares, E., Llambías, E. J. y Latorre, C. O. 1980. Geología de la provincia de la Pampa, República Argentina y geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas. *Asoc. Geológica Argentina, Revista*, XXXV (1): 87-146.
- Llambías, E. 1975. Geología de la provincia de La Pampa y su aspecto minero. *Convenio La Pampa-Universidad Nacional del Sur. Dirección de Minas, Provincia de La Pampa. Informe inédito.*
- López-Geta, J., Fornés Azcoiti A., Ramos González, J. M. y Villarroja Gil, F. 2009. Las aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo. 4° Ed. IGME. ISBN 978-84-7840-806-1.
- Malagnino, E. C., 1989. Paleoformas de origen eólico y sus relaciones con los modelos de inundación de la provincia de Buenos Aires. IV Simposio de Percepción Remota, IX Reunión Plenaria SELPER. Bariloche, Argentina. Tomo II: 611-620.
- Malán, J. M. 1981. Informe sobre los trabajos de exploración hidrogeológica realizados en la zona comprendida entre las localidades de Conhelo y Rucanelo. Dirección de Recursos Hídricos, Provincia de La Pampa.
- Malán, J. M. 1983. Estudio hidrogeológico para el abastecimiento de agua potable a la localidad de General Pico, departamento Maracó, provincia de La Pampa. Informe Preliminar. Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras, Actas III: 1449-1457, Olavarría.
- Malán, J. M. 1995. Estudios hidrogeológicos en el área Trilí-La Puma. Resultados y propuestas de ampliación. Administración Provincial del Agua, Santa Rosa (Inédito).
- Malán, J. M., Mariño, E. y Casagrande, G. 1993. Aplicación de distintos métodos para la estimación de la infiltración eficaz en áreas medanosas. V Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales, Actas II:51-54, Santa Rosa.
- Malán, J. M., Mariño, E. y Casagrande, G. 1997. Estimación de la infiltración eficaz en dos sectores del acuífero Santa Rosa-Anguill, provincia de La Pampa. I Congreso Nacional de Hidrogeología, Actas: 153-163, Bahía Blanca.
- Malán, J. M. y Miglianelli, C. 1979. Estudio Hidrogeológico para Abastecimiento de agua potable a las localidades de Montevieja. Dpto. Conhelo. Administración Provincial del Agua, Santa Rosa (Inédito).
- Malán J. M. y Ruíz E. 1978. Estudio Hidrogeológico y determinación de las fuentes para abastecimiento de agua potable a Falucho, La Pampa. Dirección de Aguas, Provincia de La Pampa.
- Manzano M., Custodio E. y Nieto, P. 2003. El fondo natural de la calidad del agua subterránea. I Seminario Hispano- Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Rosario 607-617.
- Mariño, E. E. 2003. Sistema hidrogeoquímico de un acuífero libre en ambiente medanoso en el área General Pico-Dorila, provincia de La Pampa. Tesis Doctoral en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. 142 p.

- Mariño, E. E. 2004. La interpretación hidroquímica como herramienta en la estimación de la recarga del acuífero de General Pico, La Pampa, Argentina. Cuadernos del CURIHAM, 10:57-63.
- Mariño, E. E. y Bonorino, A.G., 1996. Estimación de la infiltración eficaz en un acuífero en ambiente medanoso a partir de mediciones periódicas del nivel freático. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Acta No. IV: 405-408. Buenos Aires.
- Mariño, E. E. y Dalmaso, M. G. 2003. Análisis de la información básica para la gestión del acuífero que abastece a General Pico, La Pampa, Argentina. Memorias del III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales en hidrología subterránea, Tomo 1: 209-218, Rosario.
- Mariño, E. E. y Schulz, C. J. 2006. Importancia de la hidroquímica como indicador de la gestión del acuífero que abastece a General Pico, La Pampa, Argentina. En Sánchez Vila, X., M.C. Cabrera y M. Valverde (Eds.): Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 21:429-434, Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- Mariño, E. E., Dapeña, C. y Vera, M. C. 2005. Caracterización isotópica preliminar del área General Pico-Dorila, provincia de La Pampa, Argentina. IV Congreso Argentino de Hidrogeología, Actas II: 17-26, Río Cuarto.
- Medus, M., Mariño, E. E. y Schulz, C. J. 2005. Variación temporal de los contenidos de arsénico en la batería de pozos que abastece a General Pico, La Pampa, Argentina. Taller sobre arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento, Actas: 73-81. Río Cuarto.
- Merkel, B. y Planer-Friedrich, B. 2008. Groundwater Geochemistry. D.K. Nordstrom (Ed), 2nd edition, Springer-Verlag, The Netherlands. ISBN: 978-3-540-74667-6. 238 p.
- Miglianelli, C. 1980. Estudio de fuentes de Caleufú. Administración Provincial del Agua (trabajo inédito). Santa Rosa, La Pampa.
- Miglianelli, C. 1983. Informe sobre el pozo de abastecimiento de agua a la localidad de Ingeniero Foster. Administración Provincial del Agua (informe inédito). Santa Rosa, La Pampa.
- Morras, H. 2003. Distribución y origen de sedimentos loésicos superficiales de la pampa norte en base a la mineralogía de arenas. Resultados preliminares. Revista Asociación Argentina de Sedimentología, vol. 10 n° 1:53-64.
- Nicolli, H. B. 2006. Fuentes y movilidad del As en aguas subterráneas de la llanura Chaco-Pampeana de la Argentina. Taller de distribución de As en Iberoamérica. Red Temática 406 RT0282 IBEROARSEN. Centro Atómico Constituy. Bs. As. ISBN 84-96023-58-3. Pp 29.
- Nicolli, H., Suriano, J., Gómez Peral, m, Ferpozzi, L. y Balean, O. 1989. Groundwater contamination with Arsenic and other trace elements in an area of the province of Córdoba, Argentina. Environmental Geology and Water Sciences. 14 (1): 3-16.

- Nicolli, H. B., Smedley, P. L. y Tullio, J. O. 1997. Aguas subterráneas con altos contenidos de flúor, arsénico y otros oligoelementos en el norte de la provincia de La Pampa. Congreso Inter. del Agua. Buenos Aires.
- Nicolli, H. B., Tineo, A., García, J. W. y Falcón, C. M. 2005. Caracterización hidrogeoquímica y presencia de arsénico en las aguas subterráneas de la cuenca del Río Salí, Provincia de Tucumán, Argentina. IV Congreso Hidrogeológico Argentino, Actas: 93-102, San Fernando del Valle de Catamarca.
- Olin, M. 1995. Estimation of base level for an aquifer from recession rates of groundwater levels. *Hydrogeology journal*, 3 (2): pp. 40-51.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2011. Guidelines for Drinking-water Quality. 4th Edition 564 pp.
- Paige, C.R., Snodgrass, W. J., Nicholson, R. V., Scharer, J. 1996. The crystallization of arsenate contaminated iron hydroxide solids at high pH. *Water Environ. Res.* 68: 981–987.
- Pearce, J. M. 2000. Arsenic and Other Quality Problems in Groundwater from Northern La Pampa Province, Argentina. British Geological Survey (Vol. Technical).
- Pearson, K. 1896. Contributions to the mathematical theory of evolution, III: regresion. heredity and panmixia, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A*, 187, 253-318.
- Pereyra, F. X. 2018. Regiones geomorfológicas de Argentina. 1a ed. Avellaneda : Undav Ediciones; Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Asociación Geológica Argentina. ISBN 978-987-3896-42-2.
- Quiroz, O., Martinez, D., Dapeña, C. y Massone, H. 2008. Hydrogeochemical and isotopic tools to study groundwater flow in low gradient catchments. Study cases in the province of Buenos Aires, Argentina. *Hydrogeology Journal*, V 16 (6): 1113-1127.
- Ramonell, C. G., J. O. Tullio, A. P. Calmels y Carballo, O. C. 1993. Unidades litoestratigráficas del Cuaternario superior en el área de Santa Rosa, provincia de La Pampa. En: Calmels, A.P., J.O. Tullio y O.C. Carballo (editores), *Introducción al estudio del Cuaternario*, p233-242. Santa Rosa.
- Ramos, V. A. 1999a. Las provincias geológicas del territorio argentino. En Caminos R. (Ed.): *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Mineros. *Anales* 29 (3): 41-96, Buenos Aires.
- Ramos, V. A. 1999b. Rasgos estructurales del territorio argentino. En Caminos R. (Ed.): *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Mineros. *Anales* 29 (24): 715-784, Buenos Aires.
- Rimoldi, H. y Silva Nieto, D. 1999. Mapa geológico de la provincia de La Pampa. Secretaría de Industria, Comercio y Minería-Gobierno de la provincia de La Pampa.
- Roberto, Z. E., G. Casagrande y Viglizzo, E. F. 1994. Lluvias en la pampa central. Tendencias y variaciones del siglo. INTA- Centro Regional La Pampa-San Luis, Publicación N° 2, 25 p.

- Rodríguez, M. N. N. 2012. Simulación numérica del flujo del agua subterránea en un área de llanura, Quemú-Quemú, La Pampa, Argentina. Tesina de grado. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa. 80 p.
- Rolleri, O. 1976. Sistema de San Bárbara. 6° Congreso Geológico Argentino, Actas I: 240-255.
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L. y Gonfiantini, R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In: P.K. Swart, K.C. Lohmann, J. McKenzie and S. Savin (Eds), *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Geophysical Monograph 78, *American Geophysical Union*, Washington, D.C, pp.1-36.
- Ruíz, E. 1975. Informe expeditivo de las condiciones hidrogeológicas en la localidad de Ingeniero Foster. Administración Provincial del Agua (informe inédito). Santa Rosa, La Pampa.
- Russo, A., Ferello, R. y Chebli, G. A. 1979. Llanura Chaco Pampeana. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, 1: 139-163.
- Saguas, E. 2023. Caracterización geohidrológica e hidroquímica del noreste de la provincia de La Pampa, Argentina. Tesis de Maestría de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa.
- Salazar Lea Plaza, J. C. 1980. Carta geomorfológica. En Cano, E., Casagrande G., Conti H. A., Fernandez B., Hevia R., Lea Plaza J. C., Maldonado Pinedo D., Martinez H., Montes M. A., Scoppa C. O. y Peña Zubiate C. A. (Eds): *Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. Clima, Geomorfología, Suelo y Vegetación*. INTA-Gobierno de La Pampa-UNLPam. Santa Rosa. 493 p.
- Salso, J. H. 1966. La cuenca de Macachín, provincia de la Pampa. Nota preliminar. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 21 (2): 107-117.
- Samper Calvete, F.J. 1998. Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres. *Boletín Geológico y Minero*, 109 (4): 347- 370.
- Samper, J., Huguet, L., Ares, J. y García-Vera, M. A. 1999. Modelos interactivos de balance hidrológico. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA: Tenerife.
- Samper, J., Huguet, L., Ares, J. y García-Vera, M. A. 2005. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN V. 2.0. ENRESA, Madrid, 139 pp.
- Sánchez, F. J. 2017. Hidrología Superficial y Subterránea. Createspace Independent Publishing Platform. 414 pp. ISBN 10: 1975606604.
- Scanlon, B. R. 1991. Evaluation of moisture flux from chloride data in desert soils. *J. Hydrol*, 128: 137-156.

- Scanlon, B. R., Healy R. W. y Cook P. G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrology Journal*, 10(1):18-39.
- Schulz, C. J. 2004. Estudio Hidrogeológico del área central del Valle Argentino, La Pampa, Argentina. Elaboración de una propuesta de gestión de los recursos hídricos. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.
- Schulz, C., Castro, E., Mariño, E. y Dalmaso, M. G. 2002. El agua potable en la provincia de La Pampa. Consecuencias por presencia de arsénico. WorkShop sobre arsénico en Aguas Subterráneas. XXXII IAH & VI ALHSUD "Groundwater and Human development" Congress, Volume (CD).
- Schulz, C. J., Castro, E., Mariño, E. y Dalmaso, M. G. 2001. Occurrence of fluoride in groundwater for human consumption in the province of La Pampa, República Argentina. In K. P. Seiler y S. Wöhrlich (Eds.): *New Approches Characterizing Groundwater Flow*, 1:637-639. A.A. Balkema Pub., The Netherlands.
- Schulz, C., Castro, E. y Mariño, E. E. 2005. Presencia de arsénico en las aguas subterráneas de La Pampa. En: *Arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento*. (Galindo *et al.*, Eds.). II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea: 53-62.
- Schulz, C. y Castro E. 2003. Estudio, Planificación y Explotación del agua Subterránea. Una trilogía utópica en la República Argentina. III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano - Latinoamericano sobre Temas Actuales en Hidrología Subterránea, Actas I: 219-226, Rosario.
- Scian, B. 2003. La situación climática actual en la región semiárida pampeana. Anomalías hídricas en el Centro Sur y Oeste de la Región Pampeana. [Informe] www.criba.edu.ar/sequia/front/index.htm. Departamento de Agronomía. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.
- Sierra, L., Weinzettel, P., Dietrich, S., Cacciabue, L., Bea, S., Basso, M. y Kruse, E. 2018. Estudio de la variabilidad de la concentración de Arsénico en un sector experimental de la cuenca del Arroyo Claromecó. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, Actas I, Salta, Argentina.
- Sisul, A. 1976. Relevamiento hidrogeológico de la zona de General Pico. Consejo Provincial del Agua. 3 pp. Santa Rosa (inédito).
- Smedley, P. L., Kinniburgh, D. G., Macdonald, D. M. J., Nicolli, H. B., Barros, A.J., Tullio, J. O., Pearce, J.M. y Alonso, M. S. 2005. Arsenic associations in sediments from the loess aquifer of La Pampa, Argentina.
- Smedley, P., Macdonald, D., Nicolli H., Barros A., Tullio J. & Pearce J. 2000. Arsenic and other quality problems in groundwater from Northern La Pampa province, Argentina. Nottingham. TR WC/99/36. British Geological Survey. 176 p.
- Smedley, P. L., Nicolli, H. B., Mcdonald, D. m, Barros, A. J., y Tullio, J. O. 2002. Hydrogeochemistry of arsenic and the other constituents in groundwater from La Pampa, Argentina. *Applied Geochemistry* 17: 259-284.

- Smedley P. y Kinniburgh D. 2002. A review of the source, behaviour, and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.* 17 (2002), pp 201-235.
- Smith, A. H., Goycolea, m, Haque, R. y Biggs, M. L. 1998. Marked increase in bladder and lung cancer mortality in a region of Northern Chile due to arsenic in drinking water. *Am. J. Epidemiol.* 147: 660-669.
- SMN. 2018. Tendencias observadas en Argentina 1961-2016. Disponible en <https://www.smn.gob.ar/caracterizacion-estadisticas-de-largo-plazo>.
- Stumm, W. S. y Morgan, J. J. 1981. *Aquatic Chemistry*, 2nd Edn. Wiley-Interscience, New York, EEUU. 780 pp.
- Tabios III, G. Q. y Salas, J. D. 1985. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin. American Water Resources Association*, 21(3), 365-380. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1985.tb00147.x>
- Tardy, Y. 1971. Characterization of principal weathering types by geochemistry of waters from some European and African cristalline massifs. *Chemical Geology*, 7: 253-271.
- Teruggi, M. E. 1957. The nature and origin of the Argentine loess. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(3): 322-332.
- Teruggi, M. E. e Imbellone, P. A. 1983. Perfiles de estabilidad mineral en suelos desarrollados sobre loess de la región pampeana septentrional, Argentina. *Ciencia del suelo*, 1(1): 65-74.
- Thirunavukkarasu, O. S., Viraraghavan, T. y Subramanian K. S. 2001. Removal of arsenic in drinking water by iron oxide-coated sand and ferrihydrite - Batch studies. *WaterQual. Res. J. Canada*, 2001. Volume 36, No. 1, 55-70.
- Thornthwaite, C. W. 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38: 55-89.
- Thornthwaite, C. W. y Mather J. R. 1955. *The water balance*. Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology, VIII(1):104 p, New Jersey.
- Tickyj, H., Llambías, E. y Melchor, R., 1999a. Ordovician rocks from La Pampa Province, Argentina. En: Aceñolaza, F.G. (Ed.), *INSUGEO. Aspects of the Ordovician System in Argentina. Serie Correlación Geológica*, 16: 257-266.
- Tickyj, H., Llambías, E.J. y Sato, A.M., 1999b. El basamento cristalino de la región sur-oriental de la provincia de La Pampa: Extensión austral del Orógeno Famatiniano de Sierras Pampeanas. 14º Congreso Geológico Argentino, Actas I: 160-163, Salta.
- Tóth J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J Geophys Res*, 68 :4795–4812.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils*. U.S Department of Agriculture, Handbook 60, 160 p.
- Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam). 2015. *Inventario de los Recursos Hídricos de la provincia de La Pampa. Informe Final. Tomo I y II*. Universidad Nacional de La Pampa-Consultora.

- Usunoff E., Varni M., Weinzettel P. y Rivas R. 1999. Hidrología de grandes llanuras. La Pampa húmeda argentina. Boletín Geológico y Minero. Vol. 110-4. Año 1999 (391-406).
- Varni, M. 2004. Determinación de la variación espacial de la recarga en la cuenca del Arroyo del Azul mediante el método de balance de masa del ion cloruro. En: Cuaderno de CURIHAM, volumen 10, p 1-15.
- Varni, M. 2005. Evaluación de la recarga al acuífero del azul: valores medios y variaciones temporal y espacial. Tesis Doctoral en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Santa Fé, Argentina.
- Varni, M., Rivas, R., Weinzettel, P., Usunoff, E. y Arias, D. 1996. Estimación de la recarga por el método del balance de cloruro en la zona intermedia de la cuenca del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires. VI Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales, Actas: 245-253, Santa Rosa.
- Vergara, G., Casagrande, G., Sierra, E., Pérez, S. y Brevedan, E. 2005. Comportamiento de las precipitaciones (1921/2000) en el este de la provincia de La Pampa (Argentina). Rev. Fac. Agronomía UNLPam, ISSN 0326-6184. 11p.
- Visconti, G. 2007. Sedimentología de la Formación Cerro Azul (Mioceno superior) en la provincia de La Pampa. Tesis Doctoral. Biblioteca de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires "Luis Federico Leloir". N° de Tesis: 4084. 203 pp.
- Visconti, G., De Elorriaga, E. y Parras, A. 2003. Sedimentitas marinas de la Formación Barranca Final (Mioceno medio - superior de la cuenca del Colorado), aflorantes en el sureste de la provincia de La Pampa, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, Vol 58(2):187-193.
- Visconti, G., Melchor R. N., Montalvo C. I., Umazano A. M. y De Elorriaga, E. E. 2010. Análisis litoestratigráfico de la Formación Cerro Azul (Mioceno superior) en la provincia de La Pampa. Revista de la Asociación Geológica Argentina 67 (2): 257 – 265.
- Visconti, G., Montalvo, C. I., Cardonatto M. C. y Pugener, L. A. 1996. Análisis sedimentológico e interpretación paleoambiental de la Formación Cerro Azul (Mioceno tardío) en el valle Argentino, provincia de La Pampa. IV Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales, Comunicaciones: 86-88, Santa Rosa.
- Vital, M., Martínez, D. E., Babay, P., Quiroga, S., Clément, A. y Daval, D. 2019. Control of the mobilization of arsenic and other natural pollutants in groundwater by calcium carbonate concretions in the Pampean Aquifer, southeast of the Buenos Aires province, Argentina. Science of The Total Environment 674: 532-543.
- Vogt, T., Carballo, O. y Calmels, A. P. 1999. Un esbozo de la explicación de la génesis de las toscas de la meseta de La Pampa. 1º Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas 195-206, La Pampa.
- Way, K., Fano, L., Scott, M. y Thew, K., 1950. Nuclear data. A collection of experimental values of half lifes, radiation energies, relative isotopic

- abundances, nuclear moments and cross-sections. Natural Bureau of Standards U S Circ 499.
- Yokoyama, Y., Tanaka, K. y Takahashi, Y. 2012. Differences in the immobilization of arsenite and arsenate by calcite. *Geochim Cosmochim Acta* 91:202–219. doi: 10.1016/j.gca.2012.05.022.
- Yrigoyen, M. R. 1975. La edad cretácica del Grupo Gigante (San Luis) y su relación con cuencas circunvecinas. I Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, Actas 2: 29-56, Tucumán.
- Zambrano, J. J. 1974. Cuencas sedimentarias en el subsuelo de la provincia de Buenos Aires y zonas adyacentes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 29 (4): 443-469.
- Zárate, M. 2003. Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews* 22:1987-2006.
- Zárate, M. A. y Tripaldi, A. 2012. The aeolian system of central Argentina. *Aeolian Research* 3: 401-4017.

ANEXO

Tabla I. Ubicación de las muestras extraídas en campaña y de pozos de abastecimiento.
Profundidad del nivel freático (NF).

Fecha	Localidad	Muestra	Región Hídrica	NF (m)	Profundidad (m)	Latitud	Longitud
27/11/2018		A1	R2	2,5	Somero	-64,27805	-35,54750
27/11/2018		A2	R2	3	Somero	-64,41286	-35,55492
27/11/2018		A3	R1	3	Somero	-64,55183	-35,54381
27/11/2018		A4	R1	14,5	Somero	-64,64767	-35,59189
27/11/2018		A5	R1	95,8	Profundo	-64,79211	-35,57419
27/11/2018		A6	R1	89,9	Profundo	-64,85294	-35,52689
27/11/2018		A7	R1	93	Profundo	-64,95533	-35,57892
16/08/2017	Arata	AR04EP	R2	21	Somero	-64,34375	-35,65823
22/11/2016	Arata	AR08EP	R2	24,5	Somero	-64,35511	-35,63939
27/11/2018		B1	R2	3,8	Somero	-64,27664	-35,71547
27/11/2018		B2	R2	21,8	Somero	-64,41583	-35,64528
27/11/2018		B3	R1	21,7	Somero	-64,55092	-35,68633
27/11/2018		B4	R1	60	Profundo	-64,66447	-35,62925
27/11/2018		B5	R1	63	Profundo	-64,76858	-35,69586
27/11/2018		B6	R1	68,6	Profundo	-64,85992	-35,65775
27/11/2018		B7	R1	120	Profundo	-65,01019	-35,63625
27/11/2018		B8	R1	120,8	Profundo	-65,06286	-35,64558
27/11/2018		C1	R2	6	Somero	-64,34233	-35,76253
27/11/2018		C1r	R2	5	Somero	-64,34700	-35,77458
27/11/2018		C2	R2	34,5	Somero	-64,42306	-35,72881
27/11/2018		C3	R1	58,9	Profundo	-64,54281	-35,74511
27/11/2018		C4	R1	40,4	Profundo	-64,63603	-35,79483
27/11/2018		C5	R1	45	Profundo	-64,73353	-35,77306
27/11/2018		C6	R1	60	Profundo	-64,85150	-35,73142
27/11/2018		C7	R1	63,2	Profundo	-64,96683	-35,72350
27/11/2018		C8	R1	112,6	Profundo	-65,06483	-35,73356
16/08/2017	Caleufu	CA04EP	R1	14	Somero	-64,5588	-35,5995
31/03/2008	Caleufu	CA08EP	R1	12,6	Somero	-64,57898	-35,63252
27/11/2018		CASTEX PID	R2	8	Somero	-64,32693	-35,98233
14/03/2011	Conhelo	CO06EP	R2	93,8	Profundo	-64,5906	-36,00165
27/11/2018		D1	R2	8,5	Somero	-64,34506	-35,82944
27/11/2018		D2	R2	10,9	Somero	-64,39081	-35,84403
27/11/2018		D3	R1	58	Profundo	-64,56339	-35,85053
27/11/2018		D4	R1	72,7	Profundo	-64,63900	-35,84594
27/11/2018		D5	R1	90	Profundo	-64,80369	-35,87161
27/11/2018		D6	R1	24,8	Somero	-64,88947	-35,84089
27/11/2018		D7	R1	36,2	Profundo	-65,01581	-35,83561
27/11/2018		D8	R1	86,2	Profundo	-65,07044	-35,81653

Fecha	Localidad	Muestra	Región Hídrica	NF (m)	Profundidad (m)	Latitud	Longitud
27/11/2018		E1	R2	4,8	Somero	-64,29675	-35,98886
27/11/2018		E2	R2	28	Somero	-64,44817	-35,91275
27/11/2018		E3	R2	31,7	Somero	-64,50764	-35,91448
27/11/2018		E4	R1	76,4	Profundo	-64,61436	-35,91286
27/11/2018		E5	R1	96,2	Profundo	-64,71942	-35,90214
27/11/2018		E8	R1	54,66	Profundo	-65,05183	-35,89967
14/11/2008	Ed. Castex	EC17EP	R2	7,96	Somero	-64,29629	-35,93051
30/03/2009	Emb. Martini	EM04EP	R2	6	Somero	-64,28287	-35,37912
28/07/2008	Ingeniero Luiggi	IL08EP	R2	6	Somero	-64,46208	-35,39744
23/10/2008	Los Hornos	LH03EP	R2	53,6	Profundo	-64,44591	-35,63086
28/04/2008	La Maruja	LM01EP	R1	90	Profundo	-64,9497	-35,67212
13/08/2007	Monte Nievas	MN01EP	R2	5,1	Somero	-64,1458	-35,87441
11/04/2008	Pichi Huinca	PH02EP	R1	59,2	Profundo	-64,76693	-35,65477
19/05/2008	Trenel	TR03EP	R2	9,7	Somero	-64,12657	-35,70253

Tabla II. Mediciones de niveles freáticos (NF) y potencial hidráulico (PH) del piezómetro ubicado en la localidad de Ingeniero Luiggi.

Fecha	NF (m)	PH (m s.n.m.)	Fecha	NF (m)	PH (m s.n.m.)	Fecha	NF (m)	PH (m s.n.m.)
08/02/1992	3,62	186,38	12/04/1995	3,06	186,94	23/04/1998	2,91	187,09
05/03/1992	3,51	186,49	09/05/1995	3,03	186,97	23/06/1998	2,54	187,46
25/06/1992	3,33	186,67	13/06/1995	2,96	187,04	12/08/1998	2,79	187,21
04/08/1992	3,42	186,58	16/08/1995	3,12	186,88	22/09/1998	2,98	187,02
17/09/1992	3,14	186,86	12/09/1995	3,24	186,76	20/10/1998	3,04	186,96
07/12/1992	2,92	187,08	11/10/1995	3,16	186,84	16/12/1998	3,19	186,81
11/02/1993	2,30	187,70	17/11/1995	3,83	186,17	16/02/1999	3,54	186,46
15/06/1993	2,52	187,48	22/12/1995	3,50	186,50	13/04/1999	2,07	187,93
18/08/1993	2,82	187,18	21/02/1996	3,44	186,56	16/06/1999	2,24	187,76
17/12/1993	2,50	187,50	14/03/1996	3,58	186,42	28/07/1999	1,87	188,13
11/03/1994	3,23	186,77	16/04/1996	3,61	186,39	22/09/1999	2,59	187,41
14/04/1994	2,96	187,04	14/05/1996	3,69	186,31	17/11/1999	2,28	187,72
16/05/1994	3,17	186,83	13/06/1996	3,67	186,33	19/01/2000	2,85	187,15
08/06/1994	3,30	186,70	12/07/1996	3,69	186,31	23/03/2000	3,21	186,79
13/07/1994	3,39	186,61	15/08/1996	3,89	186,11	24/05/2000	2,95	187,05
04/08/1994	3,39	186,61	11/10/1996	4,05	185,95	26/07/2000	3,03	186,97
07/09/1994	3,24	186,76	11/12/1996	3,77	186,23	07/11/2000	3,26	186,74
13/10/1994	3,31	186,69	21/05/1997	3,41	186,59	04/01/2001	3,61	186,39
09/11/1994	3,32	186,68	13/08/1997	3,57	186,43	05/03/2001	3,83	186,17
06/12/1994	3,44	186,56	15/10/1997	3,65	186,35	09/05/2001	3,32	186,68
16/01/1995	3,32	186,68	18/10/1997	3,72	186,28	27/06/2001	3,42	186,58
17/01/1995	3,20	186,80	20/11/1997	3,77	186,23	27/08/2001	3,69	186,31
10/02/1995	3,37	186,63	20/01/1998	2,78	187,22	23/10/2001	2,85	187,15
08/03/1995	3,08	186,92	24/02/1998	2,84	187,16	12/12/2001	2,74	187,26

Fecha	NF (m)	PH (m s.n.m.)
13/02/2002	2,97	187,03
12/12/2002	2,95	187,05
02/04/2003	3,18	186,82
25/07/2003	3,15	186,85
02/12/2003	3,55	186,45
12/03/2004	3,39	186,61
19/05/2004	3,17	186,83
18/06/2004	3,18	186,82
16/07/2004	3,37	186,63
24/08/2004	3,23	186,77
24/09/2004	3,20	186,80
07/12/2004	2,85	187,15
03/05/2005	3,33	186,67
08/06/2005	3,32	186,68
02/08/2005	3,49	186,51
14/10/2005	3,07	186,93
22/11/2005	3,20	186,80
28/12/2005	3,42	186,58
08/02/2006	3,52	186,48
07/03/2006	3,63	186,37
11/04/2006	3,51	186,49
12/05/2006	3,45	186,55
13/06/2006	3,48	186,52
11/07/2006	3,67	186,33
08/08/2006	3,50	186,50
17/11/2006	3,86	186,14
19/12/2006	3,73	186,27
22/02/2007	3,73	186,27
13/04/2007	3,69	186,31
14/05/2007	3,66	186,34
27/06/2007	3,77	186,23
25/07/2007	3,83	186,17
04/09/2007	3,85	186,15
15/10/2007	3,51	186,49
05/03/2008	4,00	186,00
09/04/2008	4,00	186,00
07/05/2008	4,15	185,85
06/08/2008	4,37	185,63
10/09/2008	4,49	185,51
22/10/2008	4,46	185,54
12/11/2008	4,48	185,52

Fecha	NF (m)	PH (m s.n.m.)
10/12/2008	4,34	185,66
25/02/2009	4,60	185,40
24/03/2009	4,48	185,52
20/05/2009	4,62	185,38
17/06/2009	4,75	185,25
22/07/2009	4,90	185,10
15/09/2009	5,05	184,95
14/10/2009	4,95	185,05
10/11/2009	5,00	185,00
09/12/2009	4,82	185,18
29/12/2009	4,54	185,46
24/02/2010	4,16	185,84
29/03/2010	4,29	185,71
28/04/2010	4,39	185,61
20/05/2010	4,51	185,49
23/06/2010	4,64	185,36
21/07/2010	4,77	185,23
01/09/2010	4,69	185,31
22/09/2010	4,47	185,53
28/10/2010	4,32	185,68
14/06/2011	4,75	185,25
13/07/2011	4,77	185,23
03/08/2011	4,74	185,26
30/09/2011	4,86	185,14
24/11/2011	4,64	185,36
20/12/2011	4,71	185,29
12/01/2012	4,79	185,21
06/03/2012	4,80	185,20
27/03/2012	4,45	185,55
23/04/2012	4,59	185,41
29/05/2012	4,60	185,40
26/06/2012	4,70	185,30
24/07/2012	4,79	185,21
28/08/2012	4,71	185,29
18/09/2012	4,68	185,32
15/10/2012	4,52	185,48
05/11/2012	4,43	185,57
27/11/2012	4,50	185,50
17/01/2013	4,51	185,49
19/03/2013	4,43	185,57
23/04/2013	4,95	185,05

Fecha	NF (m)	PH (m s.n.m.)
21/05/2013	5,24	184,76
11/06/2013	5,65	184,35
20/08/2013	5,84	184,16
16/09/2013	5,91	184,09
07/10/2013	5,75	184,25
04/11/2013	5,73	184,27
10/03/2014	6,48	183,52
02/07/2014	5,42	184,58
03/08/2014	5,42	184,58
02/09/2014	5,40	184,60
30/09/2014	5,31	184,69
17/11/2014	5,40	184,60
17/12/2014	5,59	184,41
26/02/2015	5,10	184,90
15/04/2015	4,70	185,30
13/05/2015	4,48	185,52
15/06/2015	4,52	185,48
08/09/2015	4,82	185,18
06/11/2015	4,73	185,27
05/01/2016	4,28	185,72
02/03/2016	4,06	185,94
05/04/2016	3,95	186,05
06/05/2016	3,25	186,75
14/06/2016	3,53	186,47
14/07/2016	3,53	186,47
09/08/2016	3,48	186,52
06/09/2016	3,62	186,38
05/10/2016	3,20	186,80
02/11/2016	1,71	188,29
24/11/2016	1,96	188,04
08/02/2017	2,40	187,60
07/03/2017	2,48	187,52
30/05/2017	0,86	189,14
03/08/2017	1,19	188,81
10/10/2017	1,34	188,66
12/12/2017	1,52	188,48
20/02/2018	2,20	187,80
27/03/2018	2,57	187,43
05/06/2018	2,30	187,70

Tabla III. Mediciones del potencial hidráulico del freatímetro de la localidad de Arata. *Se detallan sólo los valores del primer día de cada mes, ya que los valores eran horarios.

Fecha	Potencial Hidráulico (m s.n.m.)	Fecha	Potencial Hidráulico (m s.n.m.)
01/07/2018	199,09	01/03/2020	199,75
01/08/2018	199,08	01/04/2020	199,78
01/09/2018	199,07	01/05/2020	199,87
01/10/2018	199,07	01/06/2020	199,91
01/11/2018	199,09	01/07/2020	199,89
01/12/2018	199,16	01/08/2020	199,93
01/01/2019	199,41	01/09/2020	199,83
01/02/2019	199,65	01/10/2020	199,88
01/03/2019	199,73	01/11/2020	199,89
01/04/2019	199,72	01/12/2020	199,90
01/05/2019	199,65	01/01/2021	199,85
01/06/2019	199,62	01/02/2021	199,98
01/07/2019	199,62	01/03/2021	199,94
01/08/2019	199,60	01/04/2021	199,86
01/09/2019	199,53	01/05/2021	199,92
01/10/2019	199,51	01/06/2021	199,94
01/11/2019	199,52	01/07/2021	199,91
01/12/2019	199,42	01/08/2021	199,77
01/01/2020	199,49	01/09/2021	199,76
01/02/2020	199,65	01/10/2021	199,75

Tabla IV. Concentraciones de cloruro en muestras de agua de lluvia de la localidad de Arata. PP.: Precipitaciones; C.E.: Conductividad Eléctrica; T.: Temperatura.

CÓDIGO MUESTRA	MES	FECHA	PP (mm)	Cl ⁻ (mg/L)	pH	C. E. (μS)	T. (°C)
AR CI 1	mar-18	09/03/2018	4	3,35	7,2	234	25,2
AR CI 2	mar-18	18/03/2018	11	2,66	7,09	102	-
AR CI 3	mar-18	31/03/2018	30	1,05	6,62	32	-
AR CI 4	abr-18	11/04/2018	7	1,69	6,07	132	-
AR CI 5	abr-18	23 al 25/04/2018	5	2,6	6,27	98	-
AR CI 6	abr-18	29 y 30/04/2018	3	2,36	6,26	64	-
AR CI 7	may-18	2 al 7/05/2018	26	0,02	7,8	25	27
AR CI 8	may-18	8 al 10/05/2018	10	0,01	7,5	7	26,9
AR CI 9	may-18	23 y 29/05/2018	4	2,41	6,7	182	26,9
AR CI 10	jun-18	11 y 12/06/2018	22	0,74	6,9	47	27
AR CI 11	jul-18	06/07/2018	4	4,15	7,1	242	26,8
AR CI 12	jul-18	17, 18 y 19/07/2018	12	1,18	7	91	26,8
AR CI 13	jul-18	27 y 28/07/2018	12	0,55	7	32	26
AR CI 14	ago-18	08/08/2018	2	3,5	6,8	192	25,8

CÓDIGO MUESTRA	MES	FECHA	PP (mm)	Cl ⁻ (mg/L)	pH	C. E. (μS)	T. (°C)
AR CI 15	sep-18	27,28 y 29/09/2018	22	2,29	7,1	96	25,9
AR CI 16	oct-18	18/10/2018	21	1,2	7,1	54	25,8
AR CI 17	oct-18	19, 20 y 21/10/2018	84	1,18	7,1	16	26
AR CI 18	oct-18	24/10/2018	9	0,76	6,8	24	26,1
AR CI 19	oct-18	26/10/2018	3	1,09	6,6	40	26
AR CI 20	oct-18	27, 28 y 29/10/2018	14	0,33	6,6	21	25,9
AR CI 21	nov-18	10, 11 y 12/11/2018	92	0,17	6,6	11	26
AR CI 22	nov-18	17/11/2018	5	1,67	6,6	85	26,1
AR CI 23	nov-18	22/11/2018	4	2,05	6,7	99	25,6
AR CI 24	dic-18	08/12/2018	3	6,3	7	292	25,5
AR CI 25	dic-18	10/12/2018	8	1,77	7,3	139	25,7
AR CI 26	dic-18	13/12/2018	43	0,19	7,3	14	25,7
AR CI 27	dic-18	17/12/2018	22	0,34	6,9	12	25,8
AR CI 28	dic-18	19/12/2018	24	0,7	6,7	18	25,9
AR CI 29	dic-18	26/12/2018	25	0,94	6,6	29	25,5
AR CI 30	dic-18	28 y 29/12/2018	55	0,23	6,6	8	25,6
AR CI 31	ene-19	02/01/2019	33	0,15	6,6	8	25,5
AR CI 32	ene-19	5 y 6/01/2019	37	0,34	6,4	9	25,6
AR CI 34	ene-19	11/01/2019	34	0,37	6,4	19	25,6
	ene-19	16/01/2019	4				
AR CI 35	ene-19	24/01/2019	25	0,25	6,5	17	25,7
	ene-19	25/01/2019	60				
AR CI 36	feb-19	8, 9 y 10/02/2019	7	1,83	6,6	92	25,7
AR CI 37	feb-19	20, 21 y 22/02/2019	55	0,77	6,9	29	25,6
AR CI 38	mar-19	03/03/2019	26	0,73	6,8	33	25,6
AR CI 39	mar-19	14 y 15/03/2019	25	1,14	6,9	42	25,3
AR CI 40	mar-19	28/03/2019	3	6	7,1	236	25,2
AR CI 41	abr-19	26 y 27/04/2019	39	1,36	6,8	42	22
AR CI 42	may-19	07/05/2019	16	0,97	6,3	39	21,7
AR CI 43	may-19	09/05/2019	37	0,21	6,4	12	21,6
AR CI 44	may-19	20/05/2019	5	3,03	6,7	132	21,4
AR CI 45	may-19	30 y 31/05/2019	14	1,06	6,9	55	21,9
AR CI 46	jun-19	4 y 5/06/2019	3	0,47	6,8	34	22,2
	jun-19	15 y 16/06/2019	16				
AR CI 47	sep-19	09/09/2019	15	3,87	6,8	143	22,2
	sep-19	29/09/2019	2				
AR CI 48	oct-19	15 y 16/10/2019	11	3,8	7,1	147	22
AR CI 49	nov-19	10, 11 y 12/11/2019	12	1,84	7,09	109	22,6
AR CI 50	nov-19	20/11/2019	7	1,98	7,07	118	22,5
AR CI 51	nov-19	24 y 25/11/2019	50	0,59	6,9	22	22,9

CÓDIGO MUESTRA	MES	FECHA	PP (mm)	Cl ⁻ (mg/L)	pH	C. E. (μS)	T. (°C)
AR CI 52	dic-19	02/12/2019	12	1,5	6,7	62	22,7
AR CI 53	dic-19	19 y 20/12/2019	70	1,3	6,8	65	22,5
AR CI 54	dic-19	25/12/2019	11	0,84	6,7	42	22,4
AR CI 55	dic-19	28,29 y 30/12/2019	15	0,6	6,7	34	22,6
AR CI 56	ene-20	05/01/2020	34	0,61	6,6	27	22,7
AR CI 57	ene-20	14 y 15/01/2020	37	0,59	6,5	28	23,1
AR CI 58	feb-20	01 al 04/02/2020	42	0,84	6,7	59	23,3
AR CI 59	feb-20	15 al 17/02/2020	43	0,7	6,8	28	23,1
AR CI 60	mar-20	10 y 11/03/2020	83	0,44	6,7	19	23,2
AR CI 61	mar-20	15 al 17/03/2020	70	0,18	6,5	12	23,2
AR CI 62	mar-20	28/03/2020	75	0,57	6,4	14	23,4
AR CI 63	mar-20	31/03/2020	47	0,29	6,1	9	23,8
	abr-20	01/04/2020	41				
AR CI 64	abr-20	05 y 06/04/2020	11	1,43	6,5	42	22,6
AR CI 65	abr-20	27 y 28/04/2020	38	0,71	6,2	19	22,5
AR CI 66	jul-20	04/07/2020	6	5,07	6,9	245	22,7
AR CI 67	jul-20	21/07/2020	10	1,75	7,2	156	22,7
AR CI 68	sep-20	05/09/2020	10	3,61	7,1	191	22,7
AR CI 69	sep-20	26 y 27/09/2020	17	0,76	7	36	22,9
AR CI 70	oct-20	4 y 05/10/2020	4	4,62	6,9	177	22,6
AR CI 71	oct-20	19/10/2020	12	2,33	6,9	142	22,8
AR CI 72	oct-20	26/10/2020	17	1,24	7	54	22,8
AR CI 73	nov-20	12 al 14/11/2020	17	2,59	7	112	22,8
AR CI 74	nov-20	28/11/2020	37	1,09	7,1	51	22,9
AR CI 75	dic-20	09 al 11/12/2020	11	3,81	7,3	188	23,4
AR CI 76	dic-20	23 y 24/12/2020	13	1,08	7,3	57	23,1
AR CI 77	ene-21	3,4 y 5/01/2021	10	1,57	7,2	74	23,1
AR CI 78	ene-21	12, 15 y 16/01/2021	80	0,51	7,2	29	22,7
AR CI 79	ene-21	30 y 31/01/2021	25	1,5	7	56	22,6
AR CI 80	feb-21	15/02/2021	6	4,44	7,2	160	22,8
AR CI 81	feb-21	19 al 21/02/2021	26	0,75	7,2	39	23,1
AR CI 82	mar-21	11/03/2021	10	3,43	7	98	23,2
AR CI 83	mar-21	15 al 20/03/2021	15	2,21	7,1	73	23,1
AR CI 84	mar-21	26 y 27/03/2021	60	0,47	7,2	17	23,2
AR CI 85	abr-21	09 y 10/04/2021	48	0,84	6,9	33	23,2
AR CI 86	abr-21	21 al 23/04/2021	127	0,23	6,8	21	23,8
AR CI 87	may-21	22 y 23/05/2021	37	1,25	6,9	47	28,4
AR CI 88	jun-21	21/06/2021	6	4,83	6,9	213	26,4
AR CI 89	sep-21	01/09/2021	22	3,51	7	133	26
AR CI 90	sep-21	4 al 8/09/2021	100	0,07	7	24	26

CÓDIGO MUESTRA	MES	FECHA	PP (mm)	Cl ⁻ (mg/L)	pH	C. E. (μS)	T. (°C)
AR CI 91	sep-21	20/09/2021	17	1,65	6,8	58	26,2
AR CI 92	oct-21	12 y 13/10/2021	25	2,81	6,7	77	26,4
AR CI 93	oct-21	22/10/2021	15	2,03	6,7	79	26,2
AR CI 94	oct-21	31/10/2021	53	0,57	6,8	34	25,9
	nov-21	01 al 3/11/2021	20				
AR CI 95	nov-21	20 y 21/11/2021	10	3,12	6,8	128	25,8
AR CI 96	nov-21	24/11/2021	53	0,42	7,2	23	25,8
AR CI 97	nov-21	27/11/2021	50	0,22	7,6	27	25,2
AR CI 98	dic-21	1 al 4/12/2021	90	0,21	6,7	20	26,1
AR CI 99	dic-21	8 al 12/12/2021	55	0,34	6,6	26	26
AR CI 100	dic-21	14/12/2021	12	0,44	6,5	27	25,7
AR CI 101	dic-21	17 al 20/12/2021	51	0,43	6,4	25	25,7
AR CI 102	dic-21	30/12/2021	8	3,86	6,5	137	25,9
AR CI 103	ene-22	05/01/2022	10	2,41	6,8	87	26,2
AR CI 104	ene-22	19 al 22/01/2022	28	2,04	6,9	80	26,3
AR CI 105	ene-22	26/01/2022	110	0,26	7	31	26,2
AR CI 106	feb-22	02/02/2022	20	1,11	6,8	35	26,1
AR CI 107	feb-22	04/02/2022	15	0,13	6,6	23	26
AR CI 108	feb-22	11/02/2022	35	0,7	6,6	27	26,2
AR CI 109	feb-22	19 al 21/02/2022	24	1,8	6,1	44	23,3
AR CI 110	feb-22	24/02/22	67	0,22	6,1	13	22,9
AR CI 111	mar-22	04 al 06/03/2022	30	0,81	6,1	31	23
AR CI 112	mar-22	12/03/22	18	1,06	6,2	40	22,8
AR CI 113	mar-22	17/03/2022	5	2,38	6,2	81	23,1
AR CI 114	mar-22	23/03/22	50	0,49	6,6	22	23
AR CI 115	abr-22	08/04/2022	20	1,58	6,3	56	22,8
AR CI 116	abr-22	10/04/22	17	0,85	6,5	28	22,7
AR CI 117	abr-22	27/04/22	10	2,55	6,4	101	22,7
AR CI 118	jul-22	27/07/2022	28	2,17	6,7	105	23,2
AR CI 119	ago-22	6 al 8/08/2022	5	5,63	6,5	202	23,2
AR CI 120	ago-22	17/08/2022	6	3,5	6,6	190	23,1
AR CI 121	sep-22	18/09/22	13	4,85	6,6	204	23
AR CI 122	sep-22	25/09/22	11	1,89	6,6	122	23,1
AR CI 123	oct-22	05/10/2022	35	1,26	6,8	57	23,5

Tabla V. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua subterránea del área de estudio. C.E.: Conductividad Eléctrica; R.S.: Residuo Seco; S.T.D.: Sólidos Totales Disueltos.

Muestra	pH	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	R.S. (mg/L)	S.T.D. (mg/L)	CO_3^{2-} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	F^- (mg/L)	As ($\mu\text{g}/\text{L}$)
A1	7,6	3440	2112	2652,8	0,0	1081,7	219,6	522,0	10,4	32,7	742,0	8,3	23,5	11,8	360,0
A2	8,1	2240	1394	1981,3	0,0	1174,7	40,9	107,0	3,8	8,4	550,0	6,5	19,5	17,1	620,0
A3	7,3	5130	3492	3989,1	0,0	994,3	499,8	836,5	135,3	232,7	592,0	24,9	89,0	3,1	60,0
A4	8,3	2010	1228	1795	0,0	1134,0	13,6	22,0	2,3	6,1	457,0	6,6	29,7	10,1	690,0
A5	7,4	6210	3580	3841,7	0,0	523,4	1147,4	905,0	98,0	143,8	1110,0	24,2	102,3	3,5	100,0
A6	7,4	10760	6166	6392,8	0,0	453,6	2544,6	1029,0	115,3	299,7	1880,0	38,3	89,0	3,6	80,0
A7	7,5	3950	3202	3393,9	0,0	383,8	749,8	469,5	58,1	103,7	656,0	18,8	26,1	2,0	250,0
AR04EP	8,1	1850	1140	1460	0,0	640,0	96,0	205,5	10,0	11,7	418,0		7,8	7,6	340,0
AR08EP	7,4	5190	3296	3590	0,0	588,0	920,0	791,2	48,0	72,9	1030,0		53,2	2,6	80,0
B1	8,0	2530	1552	1979,4	0,0	854,9	113,6	474,0	13,0	22,5	555,0	7,2	5,3	12,9	460,0
B2	8,0	3800	2462	3081,3	0,0	1238,7	151,5	925,0	18,2	53,2	872,0	11,8	29,7	7,0	240,0
B3	8,1	1070	646	855,4	0,0	418,7	27,3	129,0	14,7	19,7	204,0	6,8	15,9	4,5	170,0
B4	7,8	4840	3014	3493,8	0,0	959,5	484,7	1115,0	26,9	77,4	1030,0	16,9	7,5	3,9	300,0
B5	6,8	9040	5248	5405	0,0	314,0	2226,6	837,5	86,7	185,2	1696,0	24,8	90,8	2,7	40,0
B6	7,1	5140	3128	3363,5	0,0	471,0	886,1	878,0	72,8	157,2	881,0	20,8	88,6	3,3	80,0
B7	7,2	5070	2888	3053,7	0,0	331,5	1079,2	544,0	78,0	129,8	850,0	12,3	31,9	4,2	560,0
B8	7,6	2817	1618	1879,7	0,0	523,4	414,6	352,0	30,4	54,5	530,0	13,2	32,8	3,0	120,0
C1	7,8	1576	974	1357,8	0,0	767,6	34,1	133,5	9,5	22,0	342,0	5,1	12,0	7,4	290,0
C1r	7,4	2705	1674	1953,1	0,0	558,3	209,0	502,5	43,4	54,5	405,5	7,7	36,8	6,5	110,0
C2	7,5	2191	1258	1484,8	0,0	453,6	272,6	225,0	19,9	40,9	380,0	8,9	81,9	4,3	80,0
C3	8,5	3140	1850	2303,2	51,5	854,9	340,8	339,0	16,5	45,5	654,0	13,9	48,3	4,2	530,0
C4	7,7	1726	1070	1340,4	0,0	540,8	45,4	413,0	40,8	69,9	272,0	21,9	15,9	2,7	< 30
C5	7,9	3510	2190	2521,5	0,0	662,9	302,9	788,0	42,5	84,5	654,0	13,5	27,9	4,6	320,0

Muestra	pH	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	R.S. (mg/L)	S.T.D. (mg/L)	CO_3^{2-} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	F^- (mg/L)	As ($\mu\text{g}/\text{L}$)
C6	7,2	3670	3128	3555,4	0,0	854,9	386,2	462,0	25,1	57,6	714,0	10,6	7,1	7,0	120,0
C7	7,4	2598	2480	2698,1	0,0	436,2	336,3	463,5	21,7	43,3	465,0	13,1	6,2	5,0	300,0
C8	8,3	1198	986	1129,9	8,6	279,1	131,8	133,5	4,0	10,6	230,0	5,7	9,7	1,5	60,0
CA04EP	8,2	3100	1996	2248	0,0	504,0	476,0	402,0	16,0	18,5	643,0		18,9	2,4	130,0
CA08EP	8,3	1313	986	1218	16,0	448,0	72,0	233,0	10,0	8,8	322,0	7,8	9,0	2,6	60,0
CASTEX PID	8,0	4990	3062	3410,9	0,0	697,8	781,0	1097,5	59,0	165,5	974,0	20,7	6,6	9,5	
CO06EP	7,2	3440	2197	2379	0,0	364,0	604,0	550,3	42,0	49,6	713,0	27,3	34,3	1,3	240,0
D1	7,3	5680	4384	4628,2	0,0	488,5	908,8	1113,0	132,7	187,1	873,5	13,2	79,3	4,0	30,0
D2	7,4	2687	2610	2880,4	0,0	540,8	242,3	472,5	56,4	73,6	436,0	9,4	74,4	3,4	40,0
D3	7,6	2914	2670	2940,4	0,0	540,8	401,4	384,0	29,5	43,8	588,0	20,3	19,0	2,8	550,0
D4	7,6	1753	1521	1800,1	0,0	558,3	127,2	229,0	25,1	42,9	321,0	16,6	31,9	1,7	80,0
D5	7,6	842	1148	1331,2	0,0	366,4	40,9	17,5	17,3	26,8	117,0	5,1	4,0	5,2	60,0
D6	8,9	2081	2084	2541,5	60,1	854,9	68,2	153,0	1,0	1,4	469,0	6,2	18,2	8,5	420,0
D7	8,0	1750	2008	2217,4	0,0	418,7	95,4	415,0	26,0	35,5	312,0	8,7	31,9	2,7	50,0
D8	7,9	3130	2700	2909,4	0,0	418,7	439,3	567,0	8,7	16,4	651,0	9,8	21,7	5,0	550,0
E1	7,1	9070	6470	6845,1	0,0	750,2	1638,7	1432,0	105,8	260,4	1573,5	16,6	15,5	5,0	80,0
E2	7,9	2484	2248	2692,9	0,0	889,7	96,6	435,0	10,4	31,0	525,0	9,8	12,8	15,1	410,0
E3	7,9	1953	1792	2202	0,0	820,0	50,0	194,0	8,7	22,2	404,0	10,2	20,4	8,0	790,0
E4	7,5	2369	2352	2648,6	0,0	593,2	254,5	273,0	39,9	79,1	363,5	20,6	40,3	2,3	< 30
E5	7,6	3410	2804	2995,9	0,0	383,8	590,7	369,0	33,0	87,6	564,0	14,4	15,9	4,0	210,0
E8	7,6	3130	2986	3169,2	0,0	366,4	363,5	564,0	48,6	86,9	473,0	14,9	21,3	3,4	50,0
EC17EP	8,0	1440	924	1150	0,0	452,0	36,0	208,4	16,0	9,7	276,0	11,7	2,8	4,5	60,0
EM04EP	8,1	2740	1788	2064	0,0	552,0	300,0	512,9	14,0	11,7	586,5	11,7	11,5	> 8,00	570,0
IL08EP	8,3	2260	1771	2163	20,0	764,0	212,0	477,6	21,0	18,5	621,0	15,6	13,9	5,2	330,0

Muestra	pH	C.E. ($\mu\text{S/cm}$)	R.S. (mg/L)	S.T.D. (mg/L)	CO_3^{2-} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	F^- (mg/L)	As ($\mu\text{g/L}$)
LH03EP	8,4	6380	4676	5011	10,0	660,0	1472,0	1023,4	54,4	46,7	1403,0	31,2	64,9	S/D	110,0
LM01EP	8,0	1610	1197	1389	0,0	384,0	240,0	241,7	13,0	17,5	391,0	7,8	26,3	2,1	280,0
MN01EP	7,8	1515	1051	1284	0,0	466,0	110,0	260,6	27,0	14,6	322,0	3,9	5,5	3,3	90,0
PH02EP	8,0	2520	1679	1847	0,0	336,0	456,0	544,2	27,0	20,4	575,0	7,8	20,9	3,3	230,0
TR03EP	7,8	3430	3133	3323	0,0	380,0	656,0	1311,1	59,0	81,7	897,0	27,3	14,1	2,7	40,0

Tabla VI. Resultados de elementos traza en agua subterránea de las muestras extraídas en las campañas de muestreo.

Muestra	Ba ($\mu\text{g/L}$)	Al (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (mg/L)	Si (mg/L)	Ag ($\mu\text{g/L}$)	Be ($\mu\text{g/L}$)	Bi ($\mu\text{g/L}$)	Cd ($\mu\text{g/L}$)	Ce ($\mu\text{g/L}$)	Co ($\mu\text{g/L}$)	Cr ($\mu\text{g/L}$)	Fe (mg/L)	Cu ($\mu\text{g/L}$)	Li (mg/L)
A1	40	< 0,1	14,1	< 0,01	31,3	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,04	33	< 0,05
A2	50	< 0,1	4,1	< 0,01	33,1	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,07	< 2	< 0,05
A3	100	< 0,1	142	< 0,01	31,9	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,04	41	0,06
A4	20	< 0,1	2,7	< 0,01	31,6	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	1,2	29	< 0,05
A5	40	< 0,1	51,3	< 0,01	41	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	2	< 20	0,04	< 2	0,07
A6	20	0,1	115	< 0,01	39,5	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,11	< 2	0,08
A7	30	< 0,1	39,6	< 0,01	45,3	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,03	< 2	0,05
B1	40	0,2	10,1	< 0,01	33,5	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,11	4	< 0,05
B2	< 20	< 0,1	21,1	< 0,01	36,1	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,51	56	< 0,05
B3	50	< 0,1	7,7	< 0,01	34,2	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,16	3	< 0,05
B4	< 20	< 0,1	29,2	< 0,01	36,1	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,05	< 2	< 0,05
B5	50	< 0,1	67,3	0,01	35,2	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	1,54	< 2	< 0,05
B6	< 20	< 0,1	67,4	< 0,01	37,4	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,23	< 2	0,05
B7	50	< 0,1	47,7	< 0,01	19,7	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,07	< 2	0,06
B8	40	< 0,1	21,1	< 0,01	38,2	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,02	< 2	< 0,05

C1	30	< 0,1	6,7	< 0,01	33,9	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,28	3	< 0,05
C1r	30	< 0,1	19,1	< 0,01	35,2	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,03	< 2	< 0,05
C2	60	< 0,1	15,6	< 0,01	36,4	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,05	147	< 0,05
C3	40	< 0,1	17,6	< 0,01	18,1	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,04	< 2	< 0,05
C4	20	0,4	30,1	< 0,01	38,1	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,23	< 2	< 0,05
C5	20	< 0,1	32,5	< 0,01	39	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,06	< 2	< 0,05
C6	40	0,1	21,8	< 0,01	34,3	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,09	< 2	< 0,05
C7	30	< 0,1	16,3	< 0,01	32,4	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	1,05	14	< 0,05
C8	40	< 0,1	2,6	< 0,01	19,9	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,02	< 2	< 0,05
D1	20	0,3	63,7	0,02	37,1	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,27	3	0,06
D2	30	0,1	26,7	< 0,01	37,6	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	2	< 20	0,08	< 2	< 0,05
D3	40	< 0,1	17,4	0,02	40,8	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,03	< 2	< 0,05
D4	40	< 0,1	17,7	< 0,01	39,2	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,03	< 2	< 0,05
D5	70	< 0,1	10,6	< 0,01	36,9	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,02	< 2	< 0,05
D6	< 20	< 0,1	0,7	< 0,01	29	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,04	< 2	< 0,05
D7	50	< 0,1	14,9	< 0,01	33,3	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,14	< 2	< 0,05
D8	20	< 0,1	6,6	< 0,01	14,4	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,08	< 2	< 0,05
E1	20	< 0,1	97,9	< 0,01	32,5	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	3	< 20	0,04	17	< 0,05
E2	30	0,4	12,8	< 0,01	34,3	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,2	< 2	< 0,05
E3	50	< 0,1	9,3	< 0,01	31,2	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	3	< 20	0,03	< 2	< 0,05
E4	40	< 0,1	28,2	< 0,01	40,8	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,02	< 2	< 0,05
E5	40	< 0,1	35,6	< 0,01	34,1	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,08	< 2	< 0,05
E8	< 20	< 0,1	33,1	< 0,01	35,4	< 5	< 2	< 20	< 2	< 30	< 2	< 20	0,03	< 2	< 0,05

Muestra	Mo (µg/L)	Ni (µg/L)	P (mg/L)	Pb (µg/L)	Sb (µg/L)	S (mg/L)	Se (µg/L)	Sn (µg/L)	Sr (µg/L)	Te (µg/L)	Ti (µg/L)	Tl (µg/L)	U (mg/L)	V (µg/L)	W (µg/L)	Y (µg/L)	Zn (µg/L)
A1	67	5	0,03	< 10	< 10	138	< 20	< 10	290	< 10	< 10	< 10	< 0,05	1230	< 10	< 10	74

Muestra	Mo (µg/L)	Ni (µg/L)	P (mg/L)	Pb (µg/L)	Sb (µg/L)	S (mg/L)	Se (µg/L)	Sn (µg/L)	Sr (µg/L)	Te (µg/L)	Ti (µg/L)	Tl (µg/L)	U (mg/L)	V (µg/L)	W (µg/L)	Y (µg/L)	Zn (µg/L)
A2	21	< 5	0,03	< 10	< 10	25	< 20	< 10	130	< 10	< 10	< 10	< 0,05	2540	< 10	< 10	< 5
A3	95	< 5	0,05	< 10	10	174	< 20	< 10	4430	< 10	< 10	< 10	< 0,05	340	< 10	< 10	16
A4	< 5	< 5	0,06	< 10	10	11	< 20	< 10	70	< 10	< 10	< 10	< 0,05	2560	< 10	< 10	227
A5	28	5	< 0,02	< 10	< 10	211	< 20	< 10	2060	< 10	< 10	< 10	< 0,05	340	< 10	< 10	5
A6	48	< 5	0,03	< 10	20	255	< 20	< 10	2660	< 10	< 10	< 10	< 0,05	290	< 10	< 10	8
A7	11	< 5	< 0,02	< 10	20	110	< 20	< 10	960	< 10	< 10	< 10	< 0,05	680	< 10	< 10	< 5
B1	162	6	0,03	< 10	20	105	< 20	< 10	250	< 10	< 10	< 10	< 0,05	1060	< 10	< 10	5
B2	347	5	0,05	< 10	< 10	219	< 20	< 10	390	< 10	< 10	< 10	< 0,05	580	< 10	< 10	98
B3	79	5	< 0,02	< 10	< 10	28	< 20	< 10	210	< 10	< 10	< 10	< 0,05	600	< 10	< 10	18
B4	92	6	0,03	< 10	< 10	279	< 20	< 10	800	< 10	< 10	< 10	< 0,05	1110	< 10	< 10	< 5
B5	245	< 5	< 0,02	< 10	< 10	185	< 20	< 10	2110	< 10	< 10	< 10	< 0,05	300	< 10	< 10	8
B6	22	6	0,02	< 10	20	250	< 20	< 10	1460	< 10	< 10	< 10	< 0,05	390	< 10	< 10	32
B7	15	< 5	< 0,02	< 10	< 10	157	< 20	< 10	1350	< 10	< 10	< 10	< 0,05	1010	< 10	< 10	51
B8	15	< 5	0,02	< 10	< 10	86	< 20	< 10	470	< 10	< 10	< 10	< 0,05	490	< 10	< 10	< 5
C1	100	< 5	< 0,02	< 10	20	28	< 20	< 10	190	< 10	< 10	< 10	< 0,05	770	< 10	< 10	37
C1r	106	< 5	0,09	< 10	10	126	< 20	< 10	520	< 10	< 10	< 10	< 0,05	420	< 10	< 10	11
C2	8	5	0,02	< 10	< 10	49	< 20	< 10	330	< 10	< 10	< 10	< 0,05	350	< 10	< 10	9
C3	139	< 5	< 0,02	< 10	20	76	< 20	< 10	430	< 10	< 10	< 10	< 0,05	1080	< 10	< 10	< 5
C4	6	< 5	0,05	< 10	< 10	108	< 20	< 10	550	< 10	< 10	< 10	< 0,05	130	< 10	< 10	< 5
C5	57	< 5	< 0,02	< 10	20	228	< 20	< 10	1080	< 10	< 10	< 10	< 0,05	660	< 10	< 10	< 5
C6	92	< 5	0,03	< 10	< 10	111	< 20	< 10	870	< 10	< 10	< 10	< 0,05	400	< 10	< 10	< 5
C7	18	< 5	< 0,02	< 10	< 10	112	< 20	< 10	450	< 10	< 10	< 10	< 0,05	580	< 10	< 10	239
C8	10	< 5	0,03	< 10	< 10	30	< 20	< 10	60	< 10	< 10	< 10	< 0,05	280	< 10	< 10	< 5
D1	30	< 5	0,11	< 10	< 10	288	< 20	< 10	1630	< 10	10	< 10	< 0,05	140	< 10	< 10	34
D2	39	< 5	0,02	< 10	20	114	< 20	< 10	680	< 10	< 10	< 10	< 0,05	200	< 10	< 10	9

Muestra	Mo (µg/L)	Ni (µg/L)	P (mg/L)	Pb (µg/L)	Sb (µg/L)	S (mg/L)	Se (µg/L)	Sn (µg/L)	Sr (µg/L)	Te (µg/L)	Ti (µg/L)	Tl (µg/L)	U (mg/L)	V (µg/L)	W (µg/L)	Y (µg/L)	Zn (µg/L)
D3	15	5	< 0,02	< 10	20	88	< 20	< 10	590	< 10	< 10	< 10	< 0,05	1330	< 10	< 10	< 5
D4	7	< 5	0,05	< 10	< 10	52	< 20	< 10	440	< 10	< 10	< 10	< 0,05	520	< 10	< 10	< 5
D5	9	< 5	< 0,02	< 10	< 10	6	< 20	< 10	240	< 10	< 10	< 10	< 0,05	360	< 10	< 10	< 5
D6	28	< 5	0,08	< 10	10	34	< 20	< 10	20	< 10	< 10	< 10	< 0,05	3760	< 10	< 10	< 5
D7	18	5	0,02	< 10	< 10	107	< 20	< 10	550	< 10	< 10	< 10	< 0,05	280	< 10	< 10	149
D8	32	< 5	< 0,02	< 10	< 10	140	< 20	< 10	130	< 10	< 10	< 10	< 0,05	1120	< 10	< 10	11
E1	55	< 5	0,04	< 10	< 10	388	< 20	< 10	2540	< 10	< 10	< 10	< 0,05	390	< 10	< 10	21
E2	71	< 5	0,02	< 10	10	115	< 20	< 10	540	< 10	10	< 10	< 0,05	1400	< 10	< 10	< 5
E3	27	< 5	0,03	< 10	20	43	< 20	< 10	340	< 10	< 10	< 10	< 0,05	1130	< 10	< 10	8
E4	< 5	< 5	0,02	< 10	< 10	62	< 20	< 10	590	< 10	< 10	< 10	< 0,05	240	< 10	< 10	< 5
E5	15	6	< 0,02	< 10	< 10	82	< 20	< 10	650	< 10	< 10	< 10	< 0,05	410	< 10	< 10	< 5
E8	161	< 5	< 0,02	< 10	10	211	< 20	< 10	1340	< 10	< 10	< 10	< 0,05	280	< 10	< 10	< 5

Tabla VII. Valores de las especies de arsénico en µg/L. DMA: ácido dimetil-arsínico; MMA: ácido monometil-arsónico.

Identificación	As ³⁺	As ⁵⁺	DMA	MMA	As total	Localidad
07C11/04 Ep	<5	615	<5	<5	621	La Maruja
08B09/02 Ep	<5	235	<5	<5	239	Rucanelo
07C06/05 Ep	5	39	6	7	57.3	Caleufu
07C13/03 Ep	40	252	28	29	350	Pichi Huinca
A5	<4	104	<5	<9	100	
C6	<4	147	<5	<9	120	
D3	<4	620	<5	<9	550	
D4	<4	96.9	<5	<9	80	
D6	<4	488	<5	<9	420	
E5	<4	223	<5	<9	210	
01A21/11 Ep	<5	138	<5	<5	142	Ingeniero Luiggi
01A22/04 Ep	<5	562	<5	<5	567	Embajador Martini
01D12/04 Ep	<5	400	<5	<5	408	Arata
02A02/09 Ep	<5	203	<5	<5	208	Eduardo Castex
02A02/06 Ep	<5	358	<5	<5	364	Eduardo Castex
08B06/04 Ep	<5	296	<5	<5	300	Conhelo
C1r	<4	128	<5	<9	110	
E3	<4	887	<5	<9	790	

Tabla VIII. Correlación de Pearson de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea. C.E.: Conductividad Eléctrica; R.S.: Residuo Seco; S.T.D: Sólidos Totales Disueltos.

	pH	C.E.	R.S.	STD	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NO ₃ ⁻	F ⁻	As	Ba	Si	Fe	Cu	Mo	Sr	V	Zn
pH	1,00																						
C.E.	-0,51	1,00																					
R.S.	-0,51	0,95	1,00																				
STD	-0,49	0,94	1,00	1,00																			
CO ₃ ⁻²	0,56	-0,11	-0,09	-0,07	1,00																		
HCO ₃ ⁻	0,28	-0,01	-0,04	0,05	0,19	1,00																	
Cl ⁻	-0,50	0,95	0,89	0,87	-0,11	-0,25	1,00																
SO ₄ ²⁻	-0,39	0,79	0,81	0,81	-0,18	0,03	0,69	1,00															
Ca ²⁺	-0,64	0,79	0,79	0,77	-0,22	-0,19	0,74	0,72	1,00														
Mg ²⁺	-0,63	0,87	0,84	0,83	-0,19	-0,09	0,80	0,72	0,93	1,00													
Na ⁺	-0,37	0,96	0,90	0,91	-0,06	0,06	0,93	0,80	0,64	0,73	1,00												
K ⁺	-0,37	0,70	0,68	0,67	-0,11	-0,17	0,73	0,64	0,65	0,66	0,69	1,00											
NO ₃ ⁻	-0,46	0,59	0,52	0,51	-0,03	-0,10	0,58	0,37	0,68	0,59	0,49	0,51	1,00										
F ⁻	0,30	-0,14	-0,17	-0,10	0,05	0,70	-0,28	-0,17	-0,34	-0,23	-0,06	-0,40	-0,28	1,00									
As	0,38	-0,24	-0,27	-0,23	0,19	0,46	-0,30	-0,33	-0,45	-0,38	-0,16	-0,27	-0,34	0,57	1,00								
Ba	-0,08	-0,15	-0,18	-0,17	0,01	0,06	-0,15	-0,23	0,07	0,00	-0,23	-0,03	0,19	-0,05	-0,15	1,00							
Si	-0,39	0,13	0,15	0,15	-0,40	-0,05	0,12	0,17	0,27	0,24	0,09	0,38	0,22	-0,15	-0,41	-0,06	1,00						
Fe	-0,13	0,20	0,15	0,15	-0,11	0,04	0,24	0,04	0,02	0,06	0,26	0,08	0,14	0,06	0,06	-0,14	0,00	1,00					
Cu	-0,09	-0,10	-0,16	-0,17		-0,01	-0,10	-0,13	-0,13	-0,09	-0,11	0,05	0,54	-0,21	-0,23	0,41	0,33	-0,16	1,00				
Mo	0,01	0,22	0,16	0,20	0,04	0,40	0,11	0,30	0,01	0,07	0,30	0,04	0,06	0,16	-0,05	0,10	-0,02	0,45	-0,04	1,00			
Sr	-0,60	0,77	0,76	0,75	-0,18	-0,08	0,69	0,70	0,91	0,91	0,62	0,72	0,62	-0,33	-0,42	0,29	0,18	0,03	-0,04	0,11	1,00		
V	0,66	-0,24	-0,26	-0,20	0,54	0,54	-0,30	-0,36	-0,47	-0,43	-0,12	-0,37	-0,31	0,63	0,72	-0,09	-0,28	0,08	-0,13	-0,08	-0,37	1,00	
Zn	0,37	-0,31	-0,25	-0,24		0,24	-0,31	-0,29	-0,37	-0,35	-0,27	-0,26	-0,38	0,19	0,27	-0,19	-0,09	0,56	-0,12	-0,03	-0,32	0,46	1,00

Tabla IX. Composición isotópica de las precipitaciones (PP) de la Estación Santa Rosa.

Fecha	PP (mm)	$\delta^2\text{H} \text{‰}$	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$	d ‰
ago-14	65	-20,24	-4,642	17
sep-14	4,5	-9,13	-3,076	15
oct-14	211	1,57	-2,407	21
nov-14	41	-9,54	-2,911	14
dic-14	16,5	-23,45	-2,81	-1
ene-15	90	-19,71	-4,269	14
feb-15	80	-21,44	-4,052	11
mar-15	100	-16,4	-3,47	11
abr-15	139	-48,4	-7,93	15
jun-15	3	-30,8	-4,72	7
jul-15	11	-56,1	-6,8	-2
ago-15	6	-56,8	-7,74	5
sep-15	58,5	-11	-2,85	12
oct-15	117	-15,8	-3,74	14
nov-15	57,6	-0,3	-1,57	12
ene-16	163	-28	-5,19	14
feb-16	174,5	-17,5	-4,06	15
abr-16	109,5	-50,2	-7,93	13
may-16	65	-56,9	-8,83	14
jun-16	26	-64,7	-9,39	10
jul-16	22,7	-34,3	-6,13	15
sep-16	38	13,9	-0,97	22
oct-16	231,8	-31,1	-5,35	12
nov-16	49,5	-5,8	-2,52	14
dic-16	34,3	-8,8	-2,04	8
ene-17	109,9	-8	-2,47	12
feb-17	83	-46,1	-6,7	8
mar-17	402	-50,4	-8,22	15
abr-17	70,4	-68,8	-10,63	16
may-17	81	-72,6	-10,92	15
jun-17	56,5	-25,6	-4,74	12
jul-17	20,9	-24	-4,67	13
ago-17	22	-26,8	-4,91	12
sep-17	69	-22,4	-5,24	20
oct-17	30,8	4,4	-1,45	16
nov-17	67,9	-29,3	-5,21	12
dic-17	41,5	-15,9	-2,71	6
ene-18	8,2	-22,9	-2,78	-1
feb-18	44,5	2	0,86	-5
mar-18	18,1	-17,5	-3,54	11
abr-18	16,9	-26,7	-5,35	16

Fecha	PP (mm)	$\delta^2\text{H} \text{‰}$	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$	d ‰
may-18	29	-34,3	-5,61	11
jun-18	10,8	-56,5	-8,53	12
jul-18	44	-25,4	-5,9	22
ago-18	30,3	-94,6	-12,42	5
sep-18	58	-7,8	-3,06	17
oct-18	54,8	-15,6	-3,45	12
nov-18	72	-25,9	-5,04	14
dic-18	123,5	-10,8	-2,86	12
ene-19	113	-41	-6,13	8
feb-19	24,9	-17,5	-3,08	7
mar-19	21,8	-27,6	-4,85	11
abr-19	13,1	-40,8	-6,8	14
may-19	60,4	-66,7	-9,5	9
jun-19	29,5	-29,9	-5,45	14
ago-19	2	-39,4	-6,95	16
sep-19	1,5	9,9	1,68	-4
oct-19	14,5	10,4	-0,78	17
nov-19	73,2	-6,7	-2,75	15
dic-19	16,6	-23,2	-4,28	11
mar-20	228	-29,6	-5,78	17
abr-20				
may-20				
jun-20	9	-74,2	-10,32	8
jul-20	155,3	-13,5	-4,35	
ago-20				
sep-20				
oct-20	44	-1,7	-2,18	16
nov-20	31	7,4	-1,33	18
dic-20	14	-7,1	-2,28	11
ene-21	118	-33,3	-5,63	12
feb-21	58	-9,8	-2,51	10
mar-21	100	-11,7	-2,41	8
may-21	25	-34,1	-6,34	17
jun-21				
ago-21	12,2	-28,3	-5,08	12
sep-21	80,5	-29,5	-5,84	17
oct-21	47,7	5,3	-1,36	16
nov-21	67,9	-3,6	-2,76	18
dic-21	143,5	-9,6	-3,57	19
ene-22	16,2	-12,4	-3,22	13
feb-22	111	-36,5	-6,78	18

Fecha	PP (mm)	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	d ‰
mar-22	26	-35,4	-5,34	7
abr-22	68,6	-64,35	-10	16
jul-22	28	-11,2	-3,66	18
ago-22	12	-39,7	-6,63	13
sep-22	48,5	-17,1	-4,42	18
oct-22	63	-27,8	-5,88	19
mar-18	45	-16,1	-3,44	11
abr-18	15	-22,7	-4,45	13
may-18	40	-32,1	-6,03	16
jun-18	22	-65,7	-10,04	15
jul-18	28	-31,4	-6,34	19
ago-18	2	-54,4	-7,28	4
sep-18	22	-8	-3,22	18
oct-18	131	-2,1	-2,23	16
nov-18	100,5	-32,2	-6,2	17
dic-18	180	-28,7	-5,65	17
ene-19	221	-44	-7,12	13
feb-19	62	-28,2	-5,04	12
mar-19	54	-34,7	-6,27	15
abr-19	39	-67,1	-9,99	13
may-19	71,5	-50,3	-8,12	15
jun-19	19,6	-37,9	-6,41	13
sep-19	16	-10,9	-3,2	15
oct-19	10,5	-3,1	-2,67	18
nov-19	77,7	0,2	-1,75	14
dic-19	108	-22,6	-4,46	13
ene-20	71	-18,8	-3,93	13

Fecha	PP (mm)	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	d ‰
feb-20	85	-23,4	-4,54	13
mar-20	275	-19,3	-4,62	18
abr-20	90	-36,5	-6,43	15
jul-20	16	-51,1	-7,81	11
oct-20	33	-12	-3,01	12
nov-20	54	18	2,37	-1
dic-20	24	-4,6	-1,62	8
ene-21	115	-36	-6,05	12
feb-21	32	-8,1	-2,5	12
mar-21	85	-55,3	-8,66	14
abr-21	175	-45,2	-9,72	33
may-21	37	-31,9	-6,72	22
jun-21	6	-69,9	-8,64	-1
sep-21	139	-24,9	-4,92	14
oct-21	93	-2,2	-2,88	21
nov-21	83	-11,9	-3,53	16
dic-21	216	-2,3	-2,09	14
ene-22	148	-34,8	-6,55	18
feb-22	161	-25,7	-4,78	13
mar-22	103	-32,8	-5,72	13
jul-22	28	-4,2	-2,88	19
ago-22	11	-63,7	-8,65	6
sep-22	24	-4,9	-3,64	24

Tabla X. Composición isotópica de las precipitaciones (PP) de la Estación Arata.

	PP	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	d ‰
mar-18	45	-16,1	-3,44	11
abr-18	15	-22,7	-4,45	13
may-18	40	-32,1	-6,03	16
jun-18	22	-65,7	-10,04	15
jul-18	28	-31,4	-6,34	19
ago-18	2	-54,4	-7,28	4
sep-18	22	-8	-3,22	18
oct-18	131	-2,1	-2,23	16
nov-18	100,5	-32,2	-6,2	17
dic-18	180	-28,7	-5,65	17
ene-19	221	-44	-7,12	13
feb-19	62	-28,2	-5,04	12

	PP	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	d ‰
mar-19	54	-34,7	-6,27	15
abr-19	39	-67,1	-9,99	13
may-19	71,5	-50,3	-8,12	15
jun-19	19,6	-37,9	-6,41	13
sep-19	16	-10,9	-3,2	15
oct-19	10,5	-3,1	-2,67	18
nov-19	77,7	0,2	-1,75	14
dic-19	108	-22,6	-4,46	13
ene-20	71	-18,8	-3,93	13
feb-20	85	-23,4	-4,54	13
mar-20	275	-19,3	-4,62	18
abr-20	90	-36,5	-6,43	15

	PP	$\delta^2\text{H} \text{‰}$	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$	d ‰
jul-20	16	-51,1	-7,81	11
oct-20	33	-12	-3,01	12
nov-20	54	18	2,37	-1
dic-20	24	-4,6	-1,62	8
ene-21	115	-36	-6,05	12
feb-21	32	-8,1	-2,5	12
mar-21	85	-55,3	-8,66	14
abr-21	175	-45,2	-9,72	33
may-21	37	-31,9	-6,72	22
jun-21	6	-69,9	-8,64	-1

	PP	$\delta^2\text{H} \text{‰}$	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$	d ‰
sep-21	139	-24,9	-4,92	14
oct-21	93	-2,2	-2,88	21
nov-21	83	-11,9	-3,53	16
dic-21	216	-2,3	-2,09	14
ene-22	148	-34,8	-6,55	18
feb-22	161	-25,7	-4,78	13
mar-22	103	-32,8	-5,72	13
jul-22	28	-4,2	-2,88	19
ago-22	11	-63,7	-8,65	6
sep-22	24	-4,9	-3,64	24

Tabla XI. Categorización de las muestras de agua subterránea para su uso para riego.

Muestra	Peligro de Salinización	Peligro de Sodificación
A3	C4	S3
A4	C3	S4
A5	C4	S4
A6	C5	S4
A7	C4	S3
B3	C3	S2
B4	C4	S4
B5	C4	S4
B6	C4	S4
B7	C4	S4
B8	C4	S3
C3	C4	S4
C4	C3	S2
C5	C4	S4
C6	C4	S4
C7	C4	S3
C8	C3	S3
CA04EP	C4	S4
CA08EP	C3	S4
D3	C4	S4
D4	C3	S2
D5	C2	S1
D6	C3	S3
D7	C3	S2
D8	C4	S4
E4	C4	S2
E5	C4	S3

Muestra	Peligro de Salinización	Peligro de Sodificación
E8	C4	S3
LM04EP	C3	S4
PH02EP	C4	S4
A1	C4	S4
A2	C3	S4
AR04EP	C3	S4
AR08EP	C4	S4
B1	C4	S4
B2	C4	S4
C1	C3	S3
C1r	C4	S3
C2	C3	S3
CASTEX PID	C4	S4
CO06EP	C4	S4
D1	C4	S4
D2	C4	S3
E1	C4	S4
E2	C4	S4
E3	C3	S4
EC17EP	C3	S3
EM04EP	C4	S4
IL08EP	C3	S4
LH03EP	C4	S4
MN01EP	C3	S3
TR03EP	C4	S4