



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

Tesina presentada para obtener
el grado académico de
INGENIERO EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE

“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA DEL AGUA
SUBTERRÁNEA EN UN SECTOR PRÓXIMO A LA LOCALIDAD DE
QUEMÚ QUEMÚ, LA PAMPA”

Autora: LORENA CEBALLO
Director: CARLOS JUAN SCHULZ
Co-directora: LAURA MABEL WISNER

SANTA ROSA (LA PAMPA)

ARGENTINA

2012

Prefacio

Esta Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente, de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución Académica. Se llevó a cabo en la Cátedra de Hidrología Ambiental, dependiente del Departamento de Recursos Naturales, durante el período comprendido entre el 29 de Noviembre de 2010 y el 23 de Marzo de 2012, bajo la dirección de Schulz Carlos Juan y bajo la codirección de Wisner Laura Mabel.

Agradecimientos

- Al Dr. Carlos Schulz y a la Lic. Laura Wisner por su predisposición y paciencia brindada a lo largo del trabajo, y por darme la oportunidad de compartir su experiencia.
- A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales por el apoyo económico y por permitirme la utilización de sus instalaciones, especialmente el Laboratorio de Ciencias Naturales.
- A Cristina Dapeña y al INGEIS, por realizar las determinaciones isotópicas, fundamentales para el desarrollo de esta tesina.
- Al Laboratorio de Aguas de la Administración Provincial del Agua, que realizó los análisis químicos necesarios para este trabajo.
- A la Cooperativa de Quemú Quemú (COSYPRO), en especial a la Ing. Silvia Farchetto, quien me envió información y atendió a mis consultas en todo momento.
- A la municipalidad de Quemú Quemú, ya que me brindó los medios necesarios requeridos para el trabajo de campo, especialmente a José, quien desinteresadamente ayudó en todas las tareas.
- A los propietarios y empleados de los campos, quienes respetuosamente permitieron nuestro acceso.
- A Mariana Espíndola, quien realizó determinaciones químicas y con paciencia me enseñó el trabajo de laboratorio.
- A Mónica Castro, quien con más paciencia me ayudó en la utilización de imágenes satelitales del área de estudio.
- A Marcos Rodríguez, por su ayuda en el conocimiento del área de estudio y el aporte de información.
- A los geólogos Carina Arroyo y Eduardo Mariño por brindarme datos y bibliografía para la descripción geológica.
- Al personal de la APA, por la información aportada.
- A Matias por el apoyo incondicional, sugerencias y paciencia sostenida en todo momento.
- Y a todos mis compañeros, familiares y amigos que me acompañaron en estos años de estudio.

23 de Marzo de 2012

Departamento de Recursos Naturales

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

Resumen

En esta tesina se presenta una caracterización hidrogeoquímica e isotópica del agua subterránea en un sector próximo a Quemú Quemú, al Noreste de La Pampa, donde la presencia de ambientes medanosos favorece la recarga meteórica del acuífero. El área pertenece a la Llanura de Modelado Eólico Superimpuesto, que posee un manto de arena, el cual constituye el nivel superior portador del acuífero. El otro nivel, situado bajo dicho manto, está conformado por sedimentos loésicos de la Formación Cerro Azul.

Se utilizaron metodologías hidrogeológicas convencionales. En gabinete se recopilaron antecedentes del área de estudio; en campo se colectaron muestras de agua de lluvia y subterránea; y en laboratorio se realizaron los análisis físico-químicos e isotópicos correspondientes. Los resultados obtenidos establecen que la zona de recarga del acuífero coincide con el cordón medanoso que atraviesa la zona de Norte a Sur, donde se encontraron facies bicarbonatada-sódica/magnésica y bicarbonatada sódica. Hacia los laterales del cordón aumenta la salinidad y esto se evidencia en facies de tipo bicarbonatada sódica y sódica sin anión dominante, las cuales se vincularon con zonas de conducción, mientras que hacia los bajos topográficos la presencia de facies clorurada/sulfatada-sódica se relacionó con las zonas de descarga del flujo subterráneo. Desde el punto de vista isotópico, las aguas de recarga presentaron similar composición isotópica al agua de lluvia, en tanto que las aguas de descarga presentaron enriquecimiento isotópico, lo cual evidencia procesos de evaporación previos a la infiltración.

Con ambas metodologías pudo comprobarse que la recarga ocurre preferencialmente en los médanos, lo cual destaca la importancia de estos ambientes como reservorios de agua dulce, recurso impulsor del desarrollo económico, ecológico y cultural de toda población.

Palabras claves: ambientes medanosos, composición hidroquímica, composición isotópica.

Abstract

This study presents a hydrogeochemical and isotopic characterization of groundwater in an area near Quemú Quemú, northeast of La Pampa, where the presence of dunes favors meteoric recharge the aquifer. This area is part of the Wind Modeling Superimposed Plain, which has a layer of sand, which is the carrier level of the aquifer. On another level, beneath the mantle, consists of loess sediments of the Cerro Azul Formation.

Hydrogeological conventional methodologies were used. In office were collected history of the study area; in field were collected rainwater and groundwater samples, and in laboratory were carried physico-chemical and isotopic analyzes. The results establish that the aquifer recharge zone coincides with the cord running through the area from north to south, where dominated sodium/magnesium-bicarbonate and sodium bicarbonate facies. Toward both side of the cord increases the salinity and this is evidenced by sodium-bicarbonate and sodium without dominant anion facies, which are linked with areas of driving, while toward the topographic low presence of sodium-chlorinated/sulfate facies was associated with the discharge areas of groundwater flow. From the viewpoint of isotopic, water recharge had similar isotopic composition than rain water, while water discharge showed isotopic enrichment, which shows processes of evaporation prior to infiltration.

With both methods it was found that the recharge occurs preferentially in the dunes, underscoring the importance of these environments as reservoirs of freshwater, resources driving economic, ecology and culture development of the whole population.

Keywords: dunes environments, hydrochemical composition, isotopic composition.

ÍNDICE GENERAL

Prefacio
Resumen

Capítulo 1: Aspectos generales

1.1. Introducción	1
1.2. Área de estudio	2
1.2.1. Antecedentes del estudio en el área	2
1.2.2. Ubicación del área de estudio	2
1.2.3. Población y actividad agropecuaria	4
1.2.4. Servicio de agua potable cooperativo	4
1.3. Objetivos de la investigación	5
1.4. Metodología aplicada	5

Capítulo 2: Climatología

2.1. Tipo de clima	7
2.2. Pluviometría	8

Capítulo 3: Geología, geomorfología y suelo

3.1. Introducción	12
3.2. Investigaciones previas	12
3.3. Geología regional	12
3.3.1. Estratigrafía	13
3.4. Geomorfología	15
3.5. Suelos	18
3.5.1. Vegetación	18

Capítulo 4: Marco hidrogeológico

4.1. Introducción	20
4.2. Características hidrogeológicas	20
4.3. Inventario de pozos de agua	21
4.4. Características del acuífero	24
4.4.1. Parámetros hidráulicos	24
4.4.2. Estimación de reservas	24
4.4.3. Piezometría	25
4.5. Esquema del flujo subterráneo	26

Capítulo 5: Hidrogeoquímica y calidad de agua

5.1. Introducción	29
5.2. Antecedentes	30
5.3. Metodología	30
5.3.1. Sistema de muestreo del agua subterránea y de lluvias	30
5.3.2. Determinaciones físico-químicas de campo	33
5.3.3. Determinaciones físico-químicas de laboratorio	33
5.3.4. Elaboración y tratamiento de los datos	33
5.4. Resultados obtenidos	34
5.4.1. Composición físico-química del agua de lluvia	34
5.4.2. Composición físico-química del agua subterránea	35
5.5. Interpretación de los resultados de agua subterránea	38
5.5.1. Clasificación hidroquímica	38
5.5.2. Variación temporal de las relaciones iónicas	41
5.5.3. Relaciones del arsénico y los fluoruros con metales y metaloides	42
5.5.4. Variación espacial	45
5.5.4.1. Relaciones iónicas	45
5.5.4.2. Distribución espacial de la conductividad eléctrica y de los cloruros	48
5.6. Clasificación del agua para los distintos usos	53
5.6.1. Consumo humano	53
5.6.2. Consumo ganadero y riego	55
5.7. Definición de las facies hidroquímicas	56

Capítulo 6: Isótopos ambientales

6.1. Marco teórico	58
6.1.1. Composición isotópica del agua de lluvia	59
6.1.2. Composición isotópica del agua subterránea	62
6.2. Metodología	62
6.3. Caracterización isotópica del acuífero de Quemú Quemú	63
6.3.1. Composición isotópica del agua de lluvia	63
6.3.2. Composición isotópica del agua subterránea	64
6.4. Interpretación de los resultados	68

Capítulo 7: Conclusión y recomendaciones

Bibliografía	72
Anexo A: Datos climáticos	78
Anexo B: Aspectos hidroquímicos	82
Anexo C: Técnicas de laboratorio	88

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la provincia de La Pampa, del departamento Quemú Quemú y del área de estudio.	3
Figura 2: Temperatura media mensual en Quemú Quemú y temperatura media anual (1951-1970).	8
Figura 3: Histograma de la precipitación media anual por década (1921-2010).	9
Figura 4: Histograma de la precipitación media mensual (1921-2010).	9
Figura 5: Balance hídrico.	10
Figura 6: Cuadro estratigráfico.	13
Figura 7: Mapa geomorfológico.	17
Figura 8: Perfiles esquemáticos que muestran las variaciones litológicas en la subregión de las planicies medanosas.	18
Figura 9: Ubicación de los pozos de explotación, de los pozos que a futuro se incorporarán a la batería de producción, y de los piezómetros.	22
Figura 10: Ubicación de los pozos con mediciones de nivel freático, pozos de COSYPRO y piezómetros.	23
Figura 11: Isopiezas y dirección del flujo subterráneo.	25
Figura 12: Variación de los niveles piezométricos y precipitación media mensual en Quemú Quemú (1986-2006).	26
Figura 13: Esquema general de funcionamiento del acuífero.	28
Figura 14: Ubicación de las muestras de agua subterránea y de los pozos de COSYPRO.	32
Figura 15: Diagrama de Piper de las precipitaciones de 2008.	35
Figura 16: Diagrama de Piper para las muestras de perforaciones particulares.	39
Figura 17: Diagrama de Schoeller-Berkaloff para las muestras de perforaciones particulares.	40
Figura 18: Diagrama de Piper para los pozos N° 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 de COSYPRO.	41
Figura 19: Relaciones iónicas de los fluoruros y el arsénico.	42
Figura 20: Relaciones iónicas de los pozos de COSYPRO N° 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13.	46
Figura 21: Relación Dureza (mg/L de CaCO ₃)-Fluoruros (mg/L) de las muestras de perforaciones particulares.	48
Figura 22: Mapa de isovalores de conductividad eléctrica (en µS/cm) en base a los datos registrados “ <i>in situ</i> ” en las muestras de perforaciones particulares y promedio de los pozos de COSYPRO.	49
Figura 23: Distribución espacial de los cloruros (en mg/L) en base a las concentraciones medidas en las muestras de perforaciones particulares y promedio de los pozos de COSYPRO.	50
Figura 24: Variación espacial de las relaciones iónicas: Sodio/Potasio, Sodio/Calcio, Sulfatos/Cloruros y Cloruros/Bicarbonatos.	52
Figura 25: Relación entre las facies hidroquímicas y el flujo subterráneo.	57
Figura 26: Recta meteórica global.	61
Figura 27: δ ² H vs δ ¹⁸ O de las lluvias de Quemú Quemú, promedio y recta meteórica global.	64
Figura 28: δ ² H vs. δ ¹⁸ O de las muestras de agua subterránea, superficial y de las lluvias de Quemú Quemú, y recta meteórica global.	66
Figura 29: δ ² H vs. δ ¹⁸ O de las muestras de agua subterránea y de la muestra superficial	

diferenciadas por C. E., promedio para las muestras con menos de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, recta meteórica global y probables líneas de evaporación.	67
Figura 30: C. E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$) vs. $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua subterránea y superficial de Quemú Quemú, y probables procesos de salinización.	67
Figura 31: Mapa del área de estudio con ubicación de las muestras discriminadas por Conductividad Eléctrica.	68

TABLAS

Tabla 1: Datos de temperatura, humedad relativa media, viento medio y número medio de días con cielo claro, cielo cubierto y precipitación para cada mes del año en la ciudad de General Pico (1981-1990).	7
Tabla 2: Datos hidráulicos del ensayo de bombeo de los pozos de exploración, realizado en la primera sección del acuífero.	21
Tabla 3: Datos hidráulicos de los pozos de explotación de COSYPRO.	24
Tabla 4: Concentraciones medidas en agua de lluvia.	35
Tabla 5: Mediciones efectuadas en la totalidad de las muestras de agua subterránea de perforaciones particulares y en las ocho muestras sometidas a análisis completos, y resumen estadístico de las mismas.	37
Tabla 6: Resumen estadístico de los parámetros de los pozos N° 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 de COSYPRO.	38
Tabla 7: Relaciones iónicas, expresadas en Meq/L. $\text{icb} = \text{rCl}^- - \text{r}(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{rCl}^-$	42
Tabla 8: Detalle de las muestras de perforaciones particulares que no cumplen con la Ley 1027 para consumo humano.	55
Tabla 9: Análisis isotópicos de las lluvias de Quemú Quemú y resumen estadístico de los mismos.	63
Tabla 10: Análisis isotópicos de las aguas subterráneas, de la muestra superficial y resumen estadísticos de los mismos.	65

Anexo A

Tabla A.1.: Promedios pluviométricos mensuales (en mm) por década (1921-2010).	78
Tabla A.2.: Detalle de precipitaciones por mes y por año.	79
Figura A.1.: Exceso de precipitación mensual (abril 1997- julio 1999).	78

Anexo B

Tabla B.1.: Comparación entre normativas internacionales (OMS), nacionales (CAA) y provinciales (Ley N° 1027, Decreto N°193).	82
Tabla B.2.: Valores de los análisis físico-químicos completos de los pozos N° 4, 6, 7 y 10 de COSYPRO, para los años 1995, 1996 y 2009.	83
Tabla B.3.: Datos del análisis efectuado en los pozos de COSYPRO por el SEGEMAR en el año 2009.	84
Tabla B.4.: Clasificación de las muestras según el residuo seco, los tipos químicos y la relación con los sectores de recarga, conducción y descarga del acuífero.	85
Tabla B.5.: Coeficientes de correlación para los pozos de COSYPRO.	86
Tabla B.6.: Coeficientes de correlación para las perforaciones particulares.	86
Tabla B.7.: Clasificación de las aguas para bebida de bovinos.	87
Figura B.1.: Clasificación de las aguas para riego de las 8 muestras de perforaciones particulares.	87

Anexo C

- | | |
|--|----|
| 1) Técnicas empleadas por el Laboratorio de Aguas de la Administración Provincial del Agua para determinaciones físico-químicas completas. | 88 |
| 2) Técnicas empleadas por el instituto de tecnología minera del SEGEMAR. | 89 |
| 3) Técnicas empleadas por el INGEIS para determinaciones isotópicas. | 93 |

Capítulo 1: ASPECTOS GENERALES

1.1. Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida en la Tierra, tanto en términos cualitativos como cuantitativos; la deficiente disponibilidad de la misma en cualquiera de los dos aspectos provoca graves efectos negativos sobre los ecosistemas. Aunque el agua es el elemento más frecuente en la Tierra, aproximadamente el 2,5% del total es agua dulce y el resto es agua salada presente en los océanos. A su vez la mayor parte del agua dulce se encuentra inmovilizada en casquetes y hielos polares, por lo tanto sólo el 0,68% del total de agua en la Tierra se encuentra en forma de agua subterránea, mientras que el agua superficial presente en ríos y lagos de agua dulce conforma menos del 0,01% del total (Escuder *et al*, 2009). El hombre, desde tiempos ancestrales, ha adquirido la capacidad de modificar su entorno natural y adaptarlo para su beneficio personal, generando efectos que directa o indirectamente alteran a los recursos hídricos. La preocupación ante esta intensa intervención ha sido tema de discusión en reuniones internacionales; como por ejemplo en la Cumbre de las Naciones Unidas del año 2000 en donde se planteó como uno de los objetivos del milenio “reducir a la mitad la proporción de personas sin acceso al agua potable” para el año 2015 (ONU/WWAP, 2003).

La formación geológica que alberga a las aguas subterráneas se denomina acuífero y su función es almacenarla y permitir su movimiento a través de sus intersticios (Schulz, 1999). En la provincia de La Pampa los acuíferos alojados en ambientes medanosos constituyen la principal fuente de agua para el abastecimiento de la población, con la excepción del extremo Oeste donde los manantiales son los que proveen de dicho recurso. La presencia de ambientes medanosos favorece la infiltración del agua de lluvia, permitiendo la explotación de los acuíferos mediante obras de captación. Pero para ello es necesario asegurar la aptitud de tales aguas para uso de sus habitantes ya que la presencia de elementos perjudiciales, como arsénico y fluoruros, limitan su consumo.

La composición química del agua subterránea está en directa relación con la composición del agua de lluvia que infiltró en el terreno y los procesos que la misma ha sufrido en el espacio y el tiempo, con el tipo de terrenos que ha atravesado y con los procesos de mezcla y de contaminación. Consecuentemente de ello, la hidrogeoquímica resulta una herramienta fundamental que permite establecer relaciones entre la composición, distribución

y circulación del agua en los acuíferos y junto con los estudios isotópicos abren la posibilidad de indagar sobre el origen de las aguas subterráneas, trazar procesos de mezcla, evaporación y salinización (Escuder *et al*, 2009).

1.2. Área de estudio

1.2.1. Antecedentes del estudio en el área

Entre 1966 y 1969 se llevó a cabo un censo hidrogeológico de la hoja IGM 3763-3, Escala 1:100000 (Pellegrini) cuyo extremo Noroeste abarca parte de la localidad de Quemú Quemú, y fue dirigida por el Comité de Investigación de Aguas Subterráneas (Arigós, 1970). Luego, la Administración Provincial del Agua solicitó estudios de los pozos de explotación ubicados en cercanías de la localidad con la finalidad de determinar la aptitud de las aguas para consumo humano (Malán y Schulz, 1986 y 1988). Respecto a los últimos trabajos realizados pueden mencionarse el “Plan de optimización del servicio de agua potable”, presentado por Schulz (1997) en la Cooperativa de Obras, Servicios Públicos, Crédito y Provisión de Quemú Quemú Limitada (COSYPRO Ltda); el realizado por Arroyo (2005) enfocado en la determinación de la recarga; y el de Irribarra (2006), quien efectuó una caracterización geoambiental de la localidad y sus alrededores. Relacionado particularmente con la temática hídrica regional, se encuentra el “Diagnóstico sobre las inundaciones ocurridas en el NE de La Pampa” (Jensen *et al*, 2000). En lo referente a la aplicación de técnicas isotópicas, se destaca un estudio realizado en el Valle Argentino (Dapeña *et al*, 2002).

1.2.2. Ubicación del área de estudio

El área de estudio de este trabajo (Figura 1) se localiza en las inmediaciones de la localidad de Quemú Quemú, del departamento homónimo, ubicado al Noreste de la provincia de La Pampa. A este municipio se accede por la ruta provincial N° 1, la cual empalma con las rutas nacionales N° 5, hacia el Sur, y N° 188, hacia el Norte, y se encuentra a 130 km de Santa Rosa, capital de la provincia de La Pampa. Sus coordenadas geográficas, medidas en la plaza principal de la localidad, son 36°03'20" Latitud Sur y 63°33'55" Longitud Oeste. Desde el punto de vista fisiográfico se localiza en la “Subregión de las planicies medanosas” de la Región Oriental (Cano *et al*, 1980).



Figura 1: Ubicación de la provincia de La Pampa, del departamento Quemú Quemú y del área de estudio.

1.2.3. Población y actividad agropecuaria

Según datos del censo 2001, el municipio cuenta con 3851 habitantes (Dirección General de Estadísticas y Censos, 2010) y esta cifra aumenta a 4500 aproximadamente si se incluye la zona rural. Las actividades económicas se basan, desde el tiempo de su fundación en 1908, en la agricultura y la ganadería, aunque existe un importante movimiento industrial y comercial. Actualmente al sector primario se le han ido adaptando distintas variedades de cereales y oleaginosas las que, sumadas a la tradicional siembra de trigo, han permitido un aumento en la cantidad de tierras destinadas a esta actividad. La ganadería se ha visto también beneficiada por el mejoramiento de los verdeos y por el manejo planificado de suelos y pasturas. Dentro de las actividades agropecuarias el tambo es muy importante al generar la industria lechera una buena oferta laboral en el pueblo. La utilización de molinos para la extracción del agua es el principal medio para satisfacer las distintas demandas de las actividades productivas en la zona, especialmente para la bebida del ganado (COSYPRO, 2010).

1.2.4. Servicio de agua potable cooperativo

El sistema de agua potable consiste en dispositivos de extracción, conducción y distribución del agua subterránea; fue proyectado por el Ing. Carlos Opezzo en 1966 y construido por el estado provincial, quien luego otorgó la concesión, mediante un convenio, a la Cooperativa de Obras, Servicios Públicos, Crédito y Provisión de Quemú Quemú Limitada (COSYPRO Ltda.). La misma se encarga de la operación y mantenimiento del servicio, la modificación y ampliación de la red de distribución, y la incorporación de nuevos pozos para la extracción. En este sentido, la captación de agua potable para abastecimiento de la población se realiza mediante la explotación de un acuífero que abarca una superficie de 216 km², aunque la producción mediante pozos se circunscribe a un área de 5 km². Actualmente están en funcionamiento nueve pozos ubicados en el sector Noroeste de la localidad en tanto que existen cinco más que están fuera de servicio debido a la deficiente calidad del agua extraída.

Una vez captada por los pozos, el agua es bombeada a una cisterna que tiene una capacidad de 360 mil litros y que posee dos bombas elevadoras que la conducen hacia el tanque elevado, el cual tiene una capacidad de 100 mil litros. Desde este tanque el agua potable se distribuye a los domicilios. Cada tres meses, la Cooperativa realiza análisis físico-

químicos y bacteriológicos en cada uno de los pozos de extracción, en el tanque elevado y en terminales de la red de distribución (COSYPRO, 2010).

1.3. Objetivos de la investigación

El principal objetivo de esta tesina es la caracterización hidrogeoquímica del acuífero, que en particular, incluyó:

- el análisis temporal y espacial de las relaciones iónicas más importantes, así como la distribución espacial de las facies químicas en las zonas de recarga, conducción y descarga;
- la evaluación de la aptitud del agua para consumo humano, con el propósito de garantizar el acceso seguro a la población; y
- la caracterización isotópica del acuífero, a fin establecer el origen del agua de recarga.

1.4. Metodología aplicada

El desarrollo de este trabajo incluyó tareas de gabinete, de campo y de laboratorio. La primera de ellas consistió en la búsqueda de información sobre climatología, geología, geomorfología, hidrogeología e hidroquímica del área de estudio compilada en trabajos previos, así como el conocimiento de la aplicación de isótopos ambientales en hidrología. Paralelo a esto, se emplearon las cartas IGM 3763-2-2 (hoja Quemú Quemú), 3563-32-4 (Estación Trilí), 3563-33-3 (Roosevelt) y 3763-3-1 (Estancia la Hoya) para identificar los pozos de explotación y los molinos viables de muestrear, así como para tener una visión general del lugar. Estas labores permitieron la confección del mapa base y diseñar la red de muestreo, que concluyó con la delimitación del área de estudio, la cual abarcó una superficie de 664 km². En gabinete también se ordenaron y clasificaron los datos históricos de los pozos de COSYPRO provistos por la Administración Provincial del Agua de La Pampa (APA) y por la misma Cooperativa.

Las tareas de campo consistieron en la toma de muestras de agua subterránea realizada en perforaciones de establecimientos rurales, ubicados en los alrededores de Quemú Quemú, y en los pozos de COSYPRO. De cada una de las perforaciones se extrajeron dos muestras de agua subterránea, una destinada a análisis físico-químicos y la otra a análisis isotópicos, mientras que de cada uno de los pozos de COSYPRO se tomó sólo una muestra para

determinar isótopos. La información sobre las variables físico-químicas de estos últimos pozos se obtuvo a partir de los informes que frecuentemente realiza la APA. En el muestreo de campo, se incluyó también una muestra de agua superficial. Por otra parte, se obtuvieron muestras de agua de lluvia para la caracterización isotópica de las mismas en la “Estación Meteorológica Quemú Quemú”. Esta tarea fue realizada por personal de COSYPRO.

El trabajo de laboratorio contempló la ejecución de las determinaciones físico-químicas e isotópicas de las muestras de agua obtenidas en el trabajo de campo. El primer tipo de determinaciones fueron realizadas en el laboratorio del Departamento de Ciencias Naturales, de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, y en el Laboratorio de la APA, mientras que los análisis isotópicos fueron practicados en el Laboratorio de Isótopos Estables del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS).

Una vez concluidas las determinaciones analíticas, se retornó a gabinete a fin de interpretar los datos obtenidos y redactar el informe final con las conclusiones oportunas.

Capítulo 2: CLIMATOLOGÍA

2.1. Tipo de clima

El área de estudio posee un clima subhúmedo seco, con una temperatura media anual de 15,6 °C para el período 1951-1970. Los vientos predominantes son del Norte-Noreste y Sur-Suroeste, con una velocidad promedio anual de 10 km/h, siendo más intensos durante el período de septiembre a diciembre, momento en el cual aumenta el riesgo de erosión eólica, favorecido por el tipo de suelo (Cano *et al*, 1980).

Debido a la carencia de datos actuales de la localidad de Quemú Quemú, a continuación se detallan las características climáticas de la ciudad de General Pico (Tabla 1). Esta localidad se encuentra 50 km al Noroeste del área de estudio, por lo cual la proximidad a Quemú Quemú permitiría asumir que aquellas características no serían notoriamente diferentes.

Tabla 1: Datos de temperatura, humedad relativa media, viento medio y número medio de días con cielo claro, cielo cubierto y precipitación para cada mes del año en la ciudad de General Pico (1981-1990). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

mes	temperatura (°C)			humedad relativa (%)	viento medio (km/h)	número de días con		
	máxima media	media	mínima media			cielo claro	cielo cubierto	precipitación
enero	31,0	23,9	16,8	65,0	12,7	12	5	9
febrero	29,7	22,6	15,9	68,0	12,0	12	5	7
marzo	26,4	19,5	13,9	75,0	11,5	12	8	9
abril	22,9	15,9	10,4	77,0	10,5	12	7	6
mayo	18,5	11,7	6,2	76,0	10,0	10	9	5
junio	14,9	8,4	3,2	79,0	9,2	9	10	3
julio	14,5	8,1	3,1	79,0	11,0	9	9	5
agosto	17,4	10,4	4,4	71,0	12,9	10	9	4
septiembre	19,5	12,8	6,5	68,0	14,5	10	9	6
octubre	23,3	16,6	9,9	66,0	15,7	9	8	9
noviembre	26,9	19,8	13,1	65,0	14,6	11	7	9
diciembre	29,8	22,9	15,8	60,0	13,6	11	6	9

Para Quemú Quemú fue posible contar con datos de temperatura del período 1951-1970 (Casagrande G., comunicación escrita). En la Figura 2 es posible observar cómo varió la temperatura media mensual en este lapso de tiempo. En la misma se aprecia que Enero fue el mes que experimentó mayores temperaturas, alcanzando una media mensual de 24°C, en tanto que Julio fue el que registró las menores, con un valor de 7,4°C.

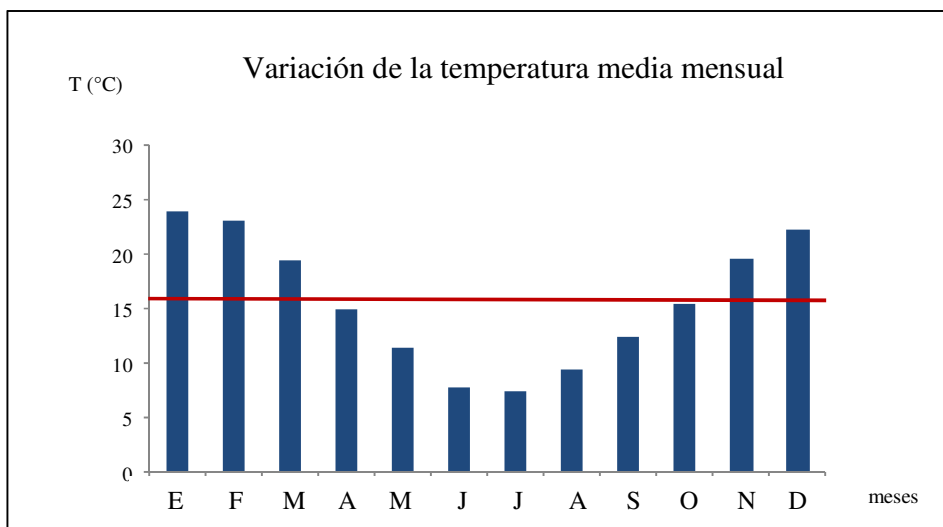


Figura 2: Temperatura media mensual en Quemú Quemú y temperatura media anual (1951-1970).

2.2. Pluviometría

Para el intervalo 1921-2010 la precipitación media anual en Quemú Quemú fue de 765 mm (<http://www.apa.lapampa.gov.ar>); los valores promedios anuales por década se exponen en la Figura 3 y los valores medios mensuales para ese mismo período se presentan en la Figura 4 (en la Tablas A.1. y A.2. del Anexo A se detallan los valores de las precipitaciones). En estas figuras puede observarse que el mes más seco es junio, mientras que hacia el verano aumentan las precipitaciones, registrándose las máximas en marzo; en tanto que las décadas de mayores precipitaciones fueron las de 1971-1980, 1981-1990 y 1991-2000, superando en todos los casos los 900 mm/año. Este comportamiento coincide con lo citado por Carreño y Viglizzo (2007), quienes afirman que hasta mediados del siglo XX en la región pampeana dominó una fase seca del ciclo pluviométrico, mientras que en la segunda mitad de ese siglo se ingresó a una fase húmeda. La tendencia de que vuelva a ingresarse a un período seco parece cumplirse según los datos de la Figura 3, donde puede observarse que a partir del año 2001 se registra un descenso en las precipitaciones.

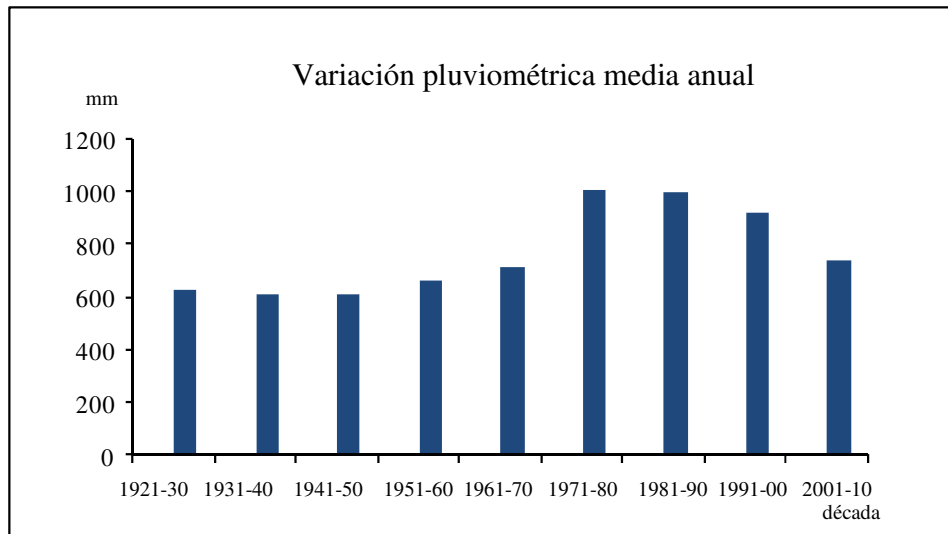


Figura 3: Histograma de la precipitación media anual por década (1921-2010). Fuente: <http://www.apa.lapampa.gov.ar>.

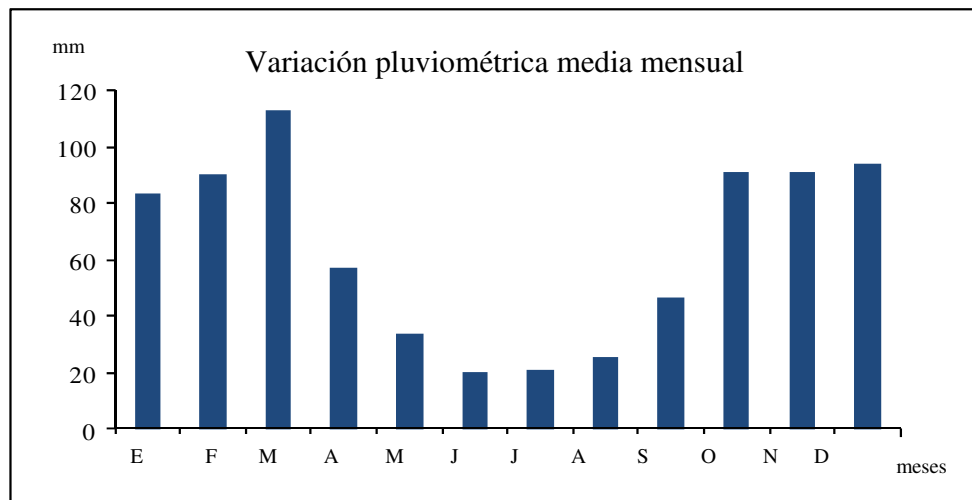


Figura 4: Histograma de la precipitación media mensual (1921-2010). Fuente: <http://www.apa.lapampa.gov.ar>.

Respecto a la evapotranspiración potencial, en base a cálculos promedios mensuales (Thornthwaite y Mather, 1955) para el período 1951-1960 en Quemú Quemú, la misma varió entre un mínimo de 51 mm para el invierno y un máximo de 381 mm hacia el verano, registrándose un total anual de 795 mm (Cano *et al*, 1980). Datos más recientes pueden encontrarse en Bellini Saibene *et al* (2000) donde se exponen los resultados de un balance hídrico mensual (1961-1998) realizado en la localidad de General Pico (la metodología utilizada para su realización fue la propuesta por Thornthwaite y Mather, 1955). Según el mismo existen dos períodos de almacenamiento de agua en el suelo; uno de ellos se da entre

septiembre y mediados de noviembre, mientras que el comprendido entre el mes de marzo y mayo, es el más importante. En la Figura 5 puede observarse dicho balance, en el cual el máximo valor de almacenaje de agua (capacidad de campo) se fijó en 200 mm.

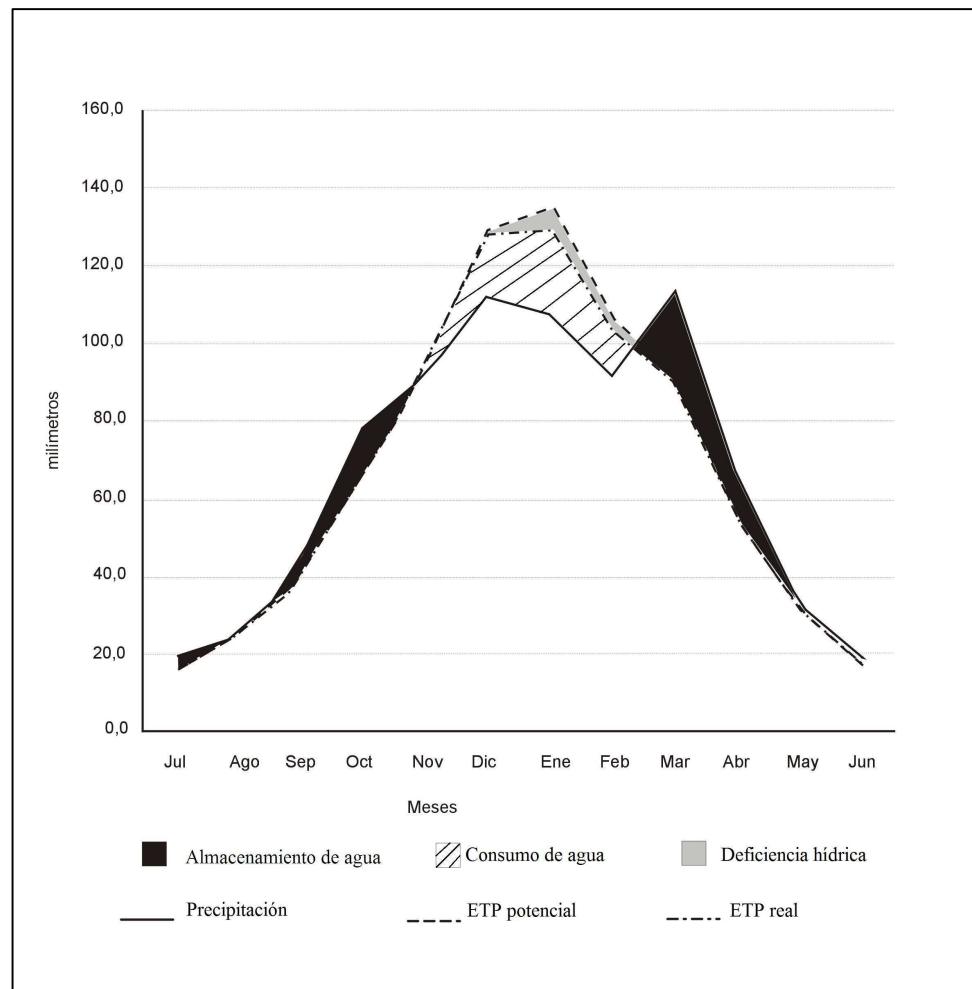


Figura 5: Balance hídrico. Fuente: Bellini Saibene *et al*, 2000.

El exceso de precipitación es una de las variables que influye en la recarga del acuífero. De acuerdo con Jensen *et al* (2000) este exceso se produce cuando la precipitación menos la evapotranspiración supera la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Así, este volumen de agua queda disponible para transferencias hídricas posteriores como evaporación desde superficies libres de agua, recarga profunda de acuíferos o conducción superficial horizontal hacia sectores topográficamente deprimidos y ubicados aguas abajo del sitio de generación del exceso. Estos excesos repercuten de manera distinta en función de la demanda atmosférica. En tal sentido, al período Marzo-Mayo le continúa la

etapa invernal de muy baja demanda, mientras que al mes de Octubre le continúa el verano, la etapa de mayor demanda (Bellini Saibene *et al*, 2000). En la Figura A.1. del Anexo A se presentan los valores estimados de exceso de precipitación mensuales para el período abril de 1997- julio de 1999, resultantes del promedio entre las localidades de Quemú Quemú, Miguel Cané, Colonia Barón, Villa Mirasol, Mauricio Mayer y Winifreda, donde puede observarse que el mayor exceso se produjo en abril de 1999.

Capítulo 3: GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y SUELO

3.1. Introducción

De acuerdo con Custodio (1976a) en un acuífero se establece un sistema de flujo en el que existen áreas de recarga, áreas de descarga y, conectando a éstas, áreas de conducción. Esta circulación del agua subterránea depende fundamentalmente de tres factores: la climatología, la geología y la geomorfología, cuya interrelación crea las condiciones reales de potencial hidráulico, temperatura y salinidad del agua, humedad del suelo, tipo de vegetación y estabilidad del terreno. La climatología fue tratada en el Capítulo 2, mientras que los dos factores restantes se abordarán en el presente, y se complementará con una descripción de los suelos y la vegetación del área de estudio. En el caso de los agentes geológicos, condicionan la permeabilidad, porosidad, transmisividad y almacenamiento; por su parte, la geomorfología influye en la disposición de las áreas de recarga y descarga y también en las aportaciones de escorrentías superficiales y precipitaciones, así como en la salinidad asociada a las mismas.

3.2. Investigaciones previas

Entre los trabajos de síntesis que pueden mencionarse sobre la geología de la provincia de La Pampa se encuentran el de Llambías (1975) y el de Linares *et al* (1980), quienes hicieron énfasis en la geología y su aspecto minero y en la geología y la geocronología de las rocas eruptivas de la provincia de La Pampa, respectivamente. Posteriormente fueron, entre otras, las investigaciones de Cano *et al* (1980), Calmels (1996) y Calmels y Casadío (2005), las que permitieron ampliar el conocimiento geológico, geomorfológico y edafológico de la provincia.

3.3. Geología regional

El área de estudio pertenece a la provincia geológica de la Llanura Chacabonaense que se extiende entre las Sierras Subandinas y las Sierras Pampeanas, al Oeste, y el río Paraná, al Este; su límite Norte se encuentra en la frontera con Bolivia y Paraguay y el Sur en el río Colorado, hundiéndose en la plataforma continental (Ramos, 1999). Dicha llanura ocupa más de 1.000.000 de km² en el territorio argentino, aunque forma parte de una unidad morfológica mucho más extensa que atraviesa todo el territorio sudamericano, comenzando en el Norte en los llanos de Colombia y Venezuela hasta terminar en nuestro país (Russo *et al*, 1979). Esta

provincia geológica fue cubierta por una delgada y continua capa loésica, que esconde varias cuencas de distintas edades y orígenes geológicos tales como cuenca Las Breñas, cuencas del Paleozoico inferior, cuenca Chacoparanense, cuenca de General Levalle, cuenca de Laboulaye, cuenca de Macachín, y su probable continuación en el Colorado, y la cuenca del Salado (Chebli *et al*, 1999). Con respecto al área de estudio, de Elorriaga (1996) y de Elorriaga y Tullio (1998) la sitúan en un alto estructural entre las cuencas de Laboulaye, al Norte, y de Macachín, al Sur (Zambrano, 1974), en tanto que el basamento cristalino según Llambías (1975) está constituido por metamorfitas de grado medio como gneises y anfibolitas de edad ordovícica.

3.3.1. Estratigrafía

El siguiente cuadro estratigráfico (Figura 6) sintetiza la secuencia según Gai y Gatto Cáceres (1996), sobre la base de los datos de una perforación ubicada en la localidad de General Pico, La Pampa.

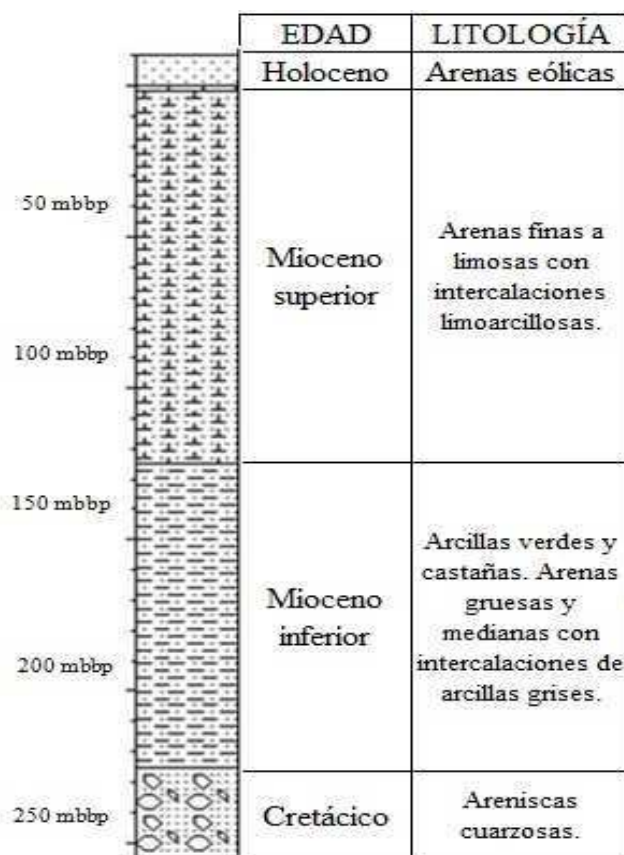


Figura 6: Cuadro estratigráfico. Modificado de Mariño, 2003.

A partir de la interpretación de la Figura 6 y de trabajos expuestos por diversos autores, puede describirse la siguiente secuencia estratigráfica:

✓ Entre los 265 y 235 mbbp se encuentran areniscas cuarzosas (Giai y Gatto Cáceres, 1996), las que se registraron también en la perforación Metileo N°1 a los 268 mbbp, en la cuenca de Laboulaye y en la subcuenca de Rosario (Calmels y Casadío, 2005). Salso (1966a, b, c) agrupó a estos sedimentos en la Formación Arata que luego Zambrano (1974) le asignó una edad Cretácica.

✓ Entre los 235 y 135 mbbp, Giai y Gatto Cáceres (1996) describieron arenas pardo rojizas, grisáceas a verde claro alternantes con fangolitas y arcillas arenosas, que pasan hacia arriba a niveles de arcillas verdosas y que poseen yeso y anhidrita en todo su espesor. Presentan características de ambiente marino en la parte superior y lacustre en la inferior. En base a datos de profundidad en la perforación Pico 1 de Obras Sanitarias de la Nación, de Elorriaga (1996) y de Elorriaga y Tullio (1998) las denominaron paquete III, correlacionándolo litológicamente con el Mioceno Rojo y el Mioceno Verde de la cuenca del Colorado (Mariño, 2003).

✓ Entre los 135 y 10 mbbp se encuentran arenas finas a limosas cementadas por material calcáreo, con intercalaciones limo-arcillosas, capas y nódulos de tosca (Giai y Gatto Cáceres, 1996). Llambías (1975) y Linares *et al* (1980) le dieron el nombre de Formación Cerro Azul a estos sedimentos, que luego Goin *et al* (2000) le asignaron una edad del Mioceno Superior, mientras que Folguera y Zárate (2009) la sitúan en un lapso temporal que se extiende desde el Mioceno tardío al Plioceno tardío. Para estos últimos autores, tradicionalmente la asignación cronológica de la entidad se estableció de acuerdo con el contenido de vertebrados fósiles, donde los niveles inferiores son portadores de una fauna de edad chasiquense y los suprayacentes de elencos faunísticos huayquerienses. De acuerdo con Llambías (1975) la Formación Cerro Azul está constituida por “limos arenosos pardo rosados a rojizos, sin estratificación interna o muy poco visible, con frecuentes clastos de arcillas rojizas y que están dispuestos horizontalmente. Presenta forma de erosión tipo loess, con barrancas y cañadones abruptos. En la parte superior, los sedimentos están reemplazados por tosca, que llega a tener hasta dos metros de espesor”.

Con respecto a aquella 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 la Formación Cerro Azul y la costra de tosca es discordante e involucra

un hiato. 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 Formación Cerro Azul constituye el principal almacén hidrogeológico de la región y entre las denominaciones informales más conocidas que recibió, caben citar las de “Formación Pampeano” (Stappenbeck, 1926; Salso, 1966c) y “Formación Pampa” (Giai, 1975).

✓ Finalmente, entre los 10 mbbp y la superficie se extiende una capa arenosa eólica, de edad Holocena, correspondiente a una unidad morfosedimentaria que cubre algo más de la cuarta parte del territorio provincial (Calmels, 1996). Sin embargo, el espesor de este extenso manto arenoso superficial es variable ya que puede tener un desarrollo vertical de entre 3 y 15 m (Malán y Schulz, 1988).

3.4. Geomorfología

Es destacable el papel de la geomorfología ya que en el área de estudio la morfología de la superficie freática presenta una conformación muy semejante a la topografía, donde los sectores altos del relieve medanoso se comportan como áreas de recarga en tanto que las depresiones constituyen lugares naturales de descarga. Calmels (1996) ubica esta área dentro de la unidad geomorfológica “De la llanura pampeana de modelado eólico superimpuesto”, caracterizada por un manto de arena en la superficie diversamente espesado (de entre 0,4 y 15 m), pero ininterrumpido. Esta unidad se extiende en las provincias limítrofes del Norte y del Este, formando parte del llamado “Mar de Arena Pampeano”, el cual es una de las dos entidades sedimentarias integrantes del Sistema Eólico Pampeano, junto con la Faja Periférica de Loess. A su vez, Calmels y Casadío (2005) sitúan al área dentro de la subunidad “Del relieve de acumulación-deflación”. Aquí el accionar de los procesos eólicos de acumulación-deflación dio origen a campos de médanos, llanuras arenosas y cubetas de deflación temporariamente inundadas. Específicamente, según Salazar Lea Plaza (1980), los procesos morfogenéticos hídricos (de escurrimiento difuso) elaboraron una superficie calcárea con pendiente regional hacia el Este, sobre el cual el viento (proceso eólico de acumulación-deflación) acumuló un manto arenoso (Figura 7). Esto formó un relieve caracterizado por ondulaciones arenosas con sentido Norte-Sur y médanos aislados. Intercaladas entre estas

ondulaciones existen planicies arenosas de 3 a 4 km de ancho, y frecuentemente áreas deprimidas con lagunas temporarias (Cano *et al*, 1980).

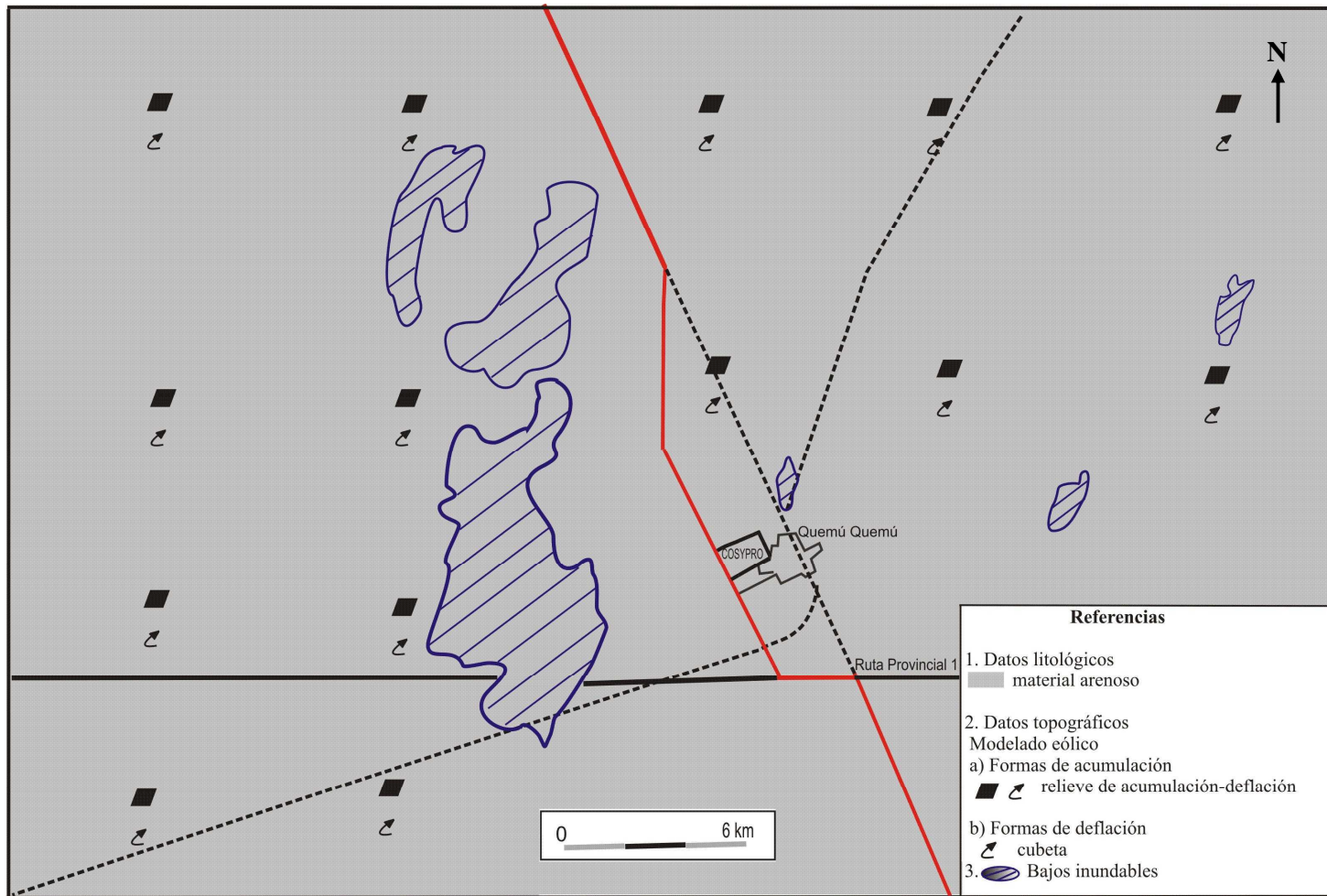


Figura 7: Mapa geomorfológico. Modificado de Salazar Lea Plaza, 1980.

3.5. Suelos

Peña Zubiarte *et al* (1980) sitúan al área dentro de la unidad cartográfica “De la planicie medanosa ondulada”. Los materiales parentales son arenas de reciente depositación, cuya textura es franco arenosa fina, con 10% de arcilla y 15% de limo total, y se registra carbonato de calcio en concreciones cerca del metro y en la masa próximo a los 2 m. El perfil es de tipo A-AC-C, con aumento de carbonatos en profundidad y alto contenido de materia orgánica. Dentro del sedimento arenoso se encuentran acumulaciones de ceniza volcánica, suelos enterrados y paleohorizontes (Figura 8).

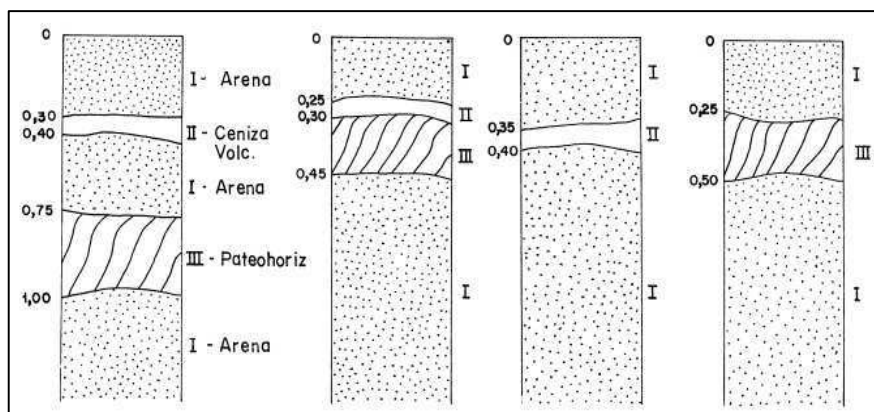


Figura 8: Perfiles esquemáticos que muestran las variaciones litológicas en la subregión de las planicies medanosas. Fuente: Cano *et al*, 1980.

El suelo superficial (capa arable) tiene buen espesor, con alto contenido de materia orgánica, reuniendo las exigencias de un epipedón mólico; tiene regímenes de humedad ústico, de temperatura térmica y su clase por tamaño de partícula es arenosa. Las limitaciones de estos suelos se relacionan con la baja capacidad de retención de la humedad, las sequías estacionales, y la erosión eólica desencadenada por el laboreo y el excesivo pastoreo. Los suelos de esta asociación se clasifican como: Haplustol éntico, familia arenosa, mixta térmica, estimándose en 80% de la superficie de la unidad, y Ustipsamente típico, familia silíceo, térmica (Cano *et al*, 1980).

3.5.1. Vegetación

Entre los cultivos forrajeros, el más importante es la alfalfa; en áreas medanosas muy suavemente onduladas se cultiva *Eragrostis curvula* (pasto llorón) y en las depresiones salinas *Agropyron elongatum* (agropiro); el problema surge con los inadecuados manejos del suelo, donde las continuas labranzas facilitan la erosión y la formación de médanos vivos (Cano *et*

al, 1980). Respecto a los cultivos de cosecha, según el Anuario Estadístico de la Dirección General de Estadísticas y Censos (2010), entre los más importantes a nivel de departamento se encuentran el girasol, el maíz, la soja y el trigo. Uno de los recursos condicionantes para el desarrollo de los mismos y para su posterior rendimiento es el agua, ya que actúa como vía de transporte de los distintos elementos minerales que necesitan los vegetales para su nutrición. Los cultivos varían sus requerimientos durante el crecimiento y desarrollo, estableciendo así una directa relación con el balance hídrico regional. La cantidad de agua utilizada está vinculada además con el rendimiento; esta relación se denominada eficiencia en el uso del agua (EUA) y se expresa como kg de materia seca por mm de agua consumida (kg MS/mm). Según datos obtenidos por Montico (2004) en la provincia de Santa Fé, para el caso de la soja este valor es de aproximadamente 9,3 kg/mm, en tanto que para el maíz es de 18,2 kg/mm. El deterioro de los suelos y la deficiente captación y retención del agua que escurre limitan la EUA de los cultivos y pasturas, más aún cuando se producen en períodos fisiológicos críticos. Los mecanismos de resistencia ante condiciones adversas dependen del tipo de cultivo, y en general se relacionan con la profundización de las raíces, el ajuste osmótico y el control de la transpiración. Por estar el área de estudio dentro de una inmensa llanura, se genera un escenario de suma fragilidad ante eventos hidrológicos extremos, de déficit o excedentes hídricos. En este último caso, la incapacidad del relieve para evacuar importantes volúmenes de agua conduce a la ocurrencia de anegamientos.

También resulta importante distinguir la periodicidad de la cubierta vegetal. En este sentido, si la vegetación es perenne tiende a mostrar patrones de evapotranspiración (ET) de largo plazo y continuos, mientras que los cultivos anuales muestran pulsos de ET de corto plazo y de acuerdo con los períodos de crecimiento activo. Por lo tanto, la sustitución de cultivos perennes por anuales pueden reducir las tasas de ET y finalmente aumentar el nivel de las aguas subterráneas debido a un período de bajo crecimiento. Este aumento puede continuar hasta que el agua subterránea alcanza la superficie y evapora directamente (Viglizzo *et al*, 2009).

Capítulo 4: MARCO HIDROGEOLÓGICO

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta una caracterización hidrogeológica del acuífero de Quemú Quemú en base a datos compilados de estudios previos realizados en la zona. De acuerdo con Llamas y Galofré (1976) puede definirse a la hidrogeología como aquella ciencia que estudia el “almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio físico y biológico, así como las reacciones frente a la acción del hombre”.

4.2. Características hidrogeológicas

En el “Estudio Hidrogeológico para la provisión de Agua Potable a Quemú Quemú” (Malán y Schulz, 1988) se describen las formaciones superficiales del área de estudio, donde se identifica una capa arenosa superficial de entre 3 y 15 m de espesor, por debajo de la cual continúan los sedimentos de la Formación Cerro Azul. La cobertura arenosa está conformada por sedimentos eólicos sueltos, algo cementados con carbonatos de calcio hacia la base, evidenciando que por su granulometría y escaso grado de consolidación constituye un buen terreno acuífero y actúa como elemento de captación y almacenaje de los excedentes hídricos. Por su parte, la Formación Cerro Azul presenta limos arenosos finos y muy finos de buen carácter acuífero, con variable grado de cementación calcárea. Así pueden reconocerse dos acuíferos: el acuífero freático alojado en la formación arenosa y el subyacente alojado en la Formación Cerro Azul. Cuando ambas secciones están saturadas conforman un acuífero multiunitario, el cual se comporta hidráulicamente como libre con drenaje diferido. Tales secciones están íntimamente relacionadas debido a que la alta permeabilidad de las arenas favorecen la recarga de origen meteórico (Giai y Gatto Cáceres, 1996).

Los niveles inferiores de la secuencia sedimentaria difieren en su comportamiento hidráulico respecto a los descritos en el párrafo anterior. Así las arcillitas miocenas, situadas bajo la Formación Cerro Azul, son acuicludas a acuitardas en ciertos tramos, en tanto que las areniscas que le suceden por debajo contienen acuíferos altamente salinos (Giai y Gatto Cáceres, 1996).

4.3. Inventario de pozos de agua

La caracterización hidráulica del sistema se realizó en base a información suministrada por las distintas perforaciones presentes en el área, correspondientes a:

a) Pozos de exploración: corresponden a cuatro pozos construidos en 1986 por la Administración Provincial del Agua (APA) de la Provincia de La Pampa con el objetivo de abastecer de agua potable a Quemú Quemú. Los mismos recibieron los nombres de Pozo N° 1, N° 2, N° 3 y N° 4 (Tabla 2).

Tabla 2: Datos hidráulicos del ensayo de bombeo de los pozos de exploración, realizado en la primera sección del acuífero. Fuente: Malán y Schulz, 1986. s/d: sin datos.

Pozo N°	Profundidad (m)	Nivel estático	Nivel dinámico	Caudal (m ³ /h)	Transmisividad (m ³ /d.m.)	Permeabilidad (m/día)
1	26	1,95	4,52	6	94	4
2	26	3,05	6,65	7,5	117,6	5,62
3	26	5,78	12,04	9	136	s/d
4	23,5	2,97	9,87	10	204	10

Posteriormente, en inmediaciones a estos pozos se construyeron cuatro pozos más que pasaron a formar parte de la batería nueva de explotación, y pasaron a denominarse pozos N° 4, 5, 6 y 7. Hasta ese momento existían cuatro pozos de explotación en cercanías a la localidad, de los cuales no se dispone de datos hidráulicos, y dejaron de funcionar a partir de la puesta en marcha de la nueva batería de pozos (Arroyo C., comunicación escrita).

b) Pozos de explotación: corresponden a los pozos construidos por la APA desde fines de la década del 80' hasta la fecha. Como se dijo anteriormente, se trata de los pozos N° 4, 5, 6 y 7, a los cuales en los últimos años se sumaron los pozos N° 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14, y en septiembre de 2011 se iniciaron los trabajos para agregar a la batería de explotación cuatro pozos más. Es preciso aclarar que, dado la deficiente calidad del agua extraída, actualmente están fuera de servicio el N° 5 (desde fines de 2006) y el N° 8 (desde fines de 2008). En el apartado 4.4.1. se detallan los parámetros hidráulicos de estos pozos, y a continuación (Figura 9) se muestra su localización.

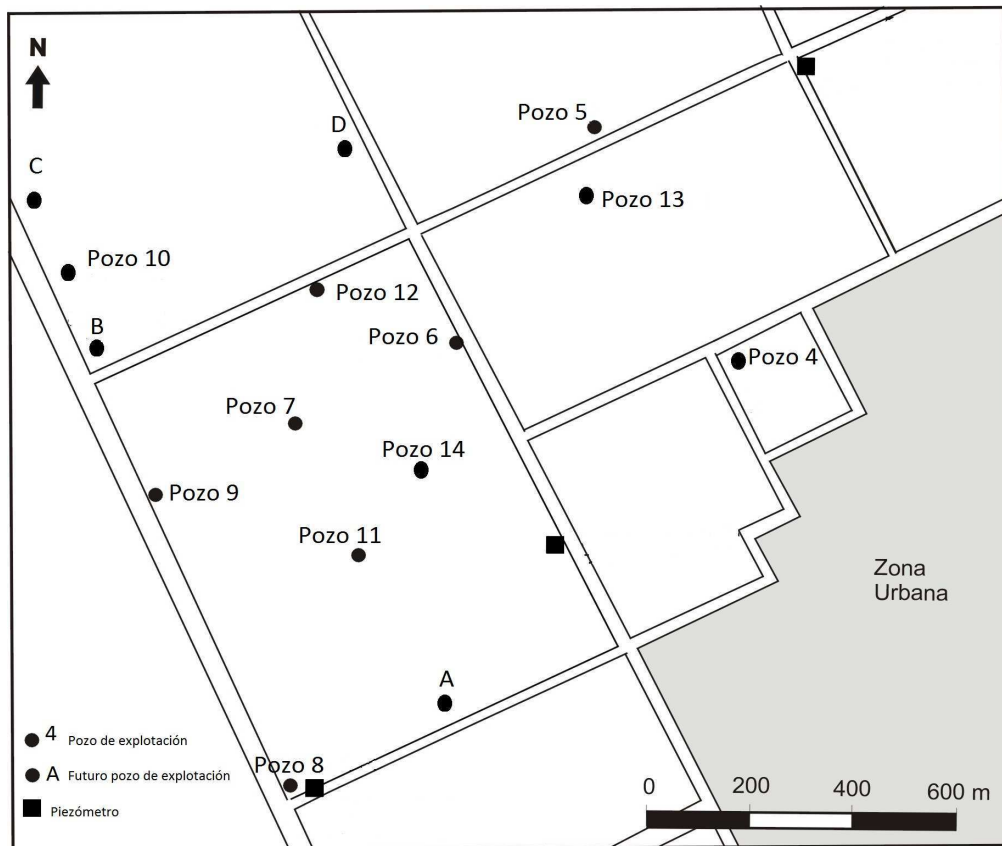


Figura 9: Ubicación de los pozos de explotación, de los pozos que a futuro se incorporarán a la batería de producción, y de los piezómetros. Modificado de Arroyo, 2005.

c) Piezómetros: a fin de tener un control de los niveles del agua en el acuífero, en 1986 se instalaron tres piezómetros (cuya ubicación se muestra en la Figura 9), dos de ellos ubicados al Oeste (piezómetros N° 2 y N° 3) y el otro al Norte (piezómetro N° 1) de Quemú Quemú. Los mismos integran una extensa red de piezómetros construida y operada por la APA, que abarca el Noreste de La Pampa, y que en Quemú Quemú permite contar con registros desde 1986.

d) Pozos particulares: corresponde a los pozos censados por Rodríguez *et al* (2011), quien registró la profundidad del nivel freático en una amplia área dentro de la zona de estudio, la mayoría de ellos pertenecientes a establecimientos rurales.

En la Figura 10 puede observarse la ubicación de estos pozos.

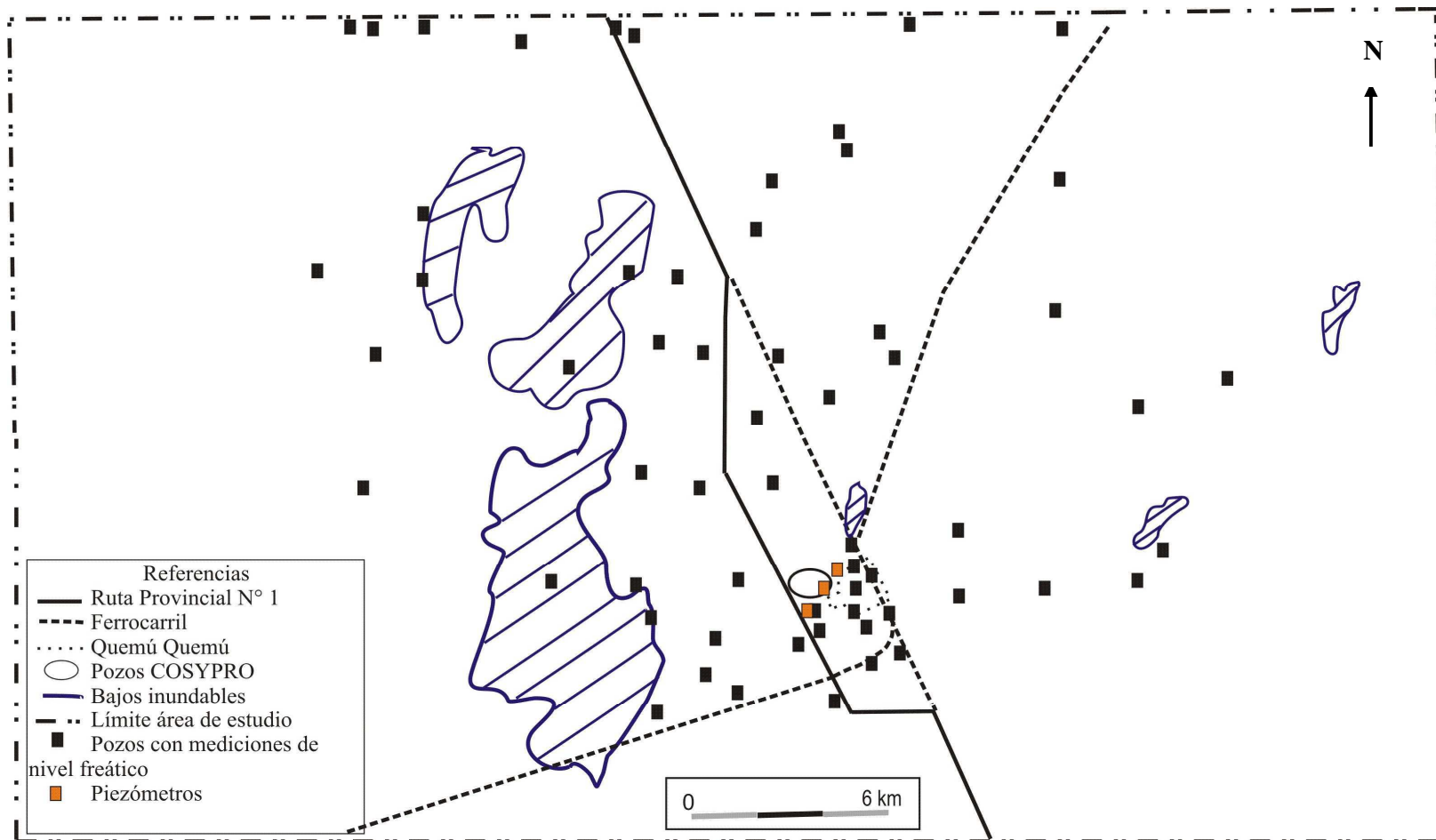


Figura 10: Ubicación de los pozos con mediciones de nivel freático, pozos de COSYPRO y piezómetros.

4.4. Características del acuífero

4.4.1. Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos corresponden al terreno acuífero ubicado en la Formación Cerro Azul y sus valores fueron determinados en la mayoría de los casos por ensayos de recuperación en pozos de bombeo. Así, el coeficiente de almacenamiento es de 5×10^{-2} , calculado para una profundidad de 18 m, y la transmisividad tiene un valor de $108 \text{ m}^2/\text{día}$ (Malán y Schulz, 1988). Otros datos pueden observarse en la Tabla 3 y corresponden a las fichas de los pozos de COSYPRO.

Tabla 3: Datos hidráulicos de los pozos de explotación de COSYPRO. Fuente: COSYPRO, 2011, y Arroyo C., comunicación escrita.

Pozo N°	Profundidad (m)	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Caudal (m^3/h)	Horas
4	20,5	2,95	10,54	12	12
5	22	3,1	12,34	12	12
6	24	5,12	11,94	12	12
7	22	3,12	11,05	12	12
8	24	1,96	13,19	12	12
9	24	3,66	15,6	12	12
10	24	3,21	11,21	12	12
11	23	6,4	17,2	12	12
12	23,5	4,4	16,75	12	12
13	20,2	7,03	13,37	14,77	12
14	18	5,68	12,08	11,66	12,5
A	16	5,08	10,77	12	8
B	17,5	4,82	15,38	12	8
C	17,3	5,37	10,76	9	8
D	17,5	5,64	15,57	10,28	8

4.4.2. Estimación de reservas

Si bien el área acuífera es muy extensa, el sector ocupado por los pozos de explotación abarca un área de unos 5 km^2 . Si se considera un espesor saturado de 20 m y un coeficiente de almacenamiento de 5×10^{-2} se tendría una reserva del orden de 5 millones de m^3 de agua con aptitud para consumo humano (Malán y Schulz, 1988). En cuanto a la reposición del recurso por recarga, según estimaciones de la misma mediante el método del balance del ión cloruro se obtuvo un valor medio anual de 97,13 mm, en tanto que a partir del análisis de las fluctuaciones del nivel freático la recarga media anual arrojó un valor de 79,94 mm/año (Arroyo, 2005).

4.4.3. Piezometría

El acuífero bajo estudio se encuentra dentro del “área Nororiental”, según la denominación dada por Giai (1987) en su trabajo sobre la superficie freática de la provincia de La Pampa. Dicho autor destaca de esta área que la superficie freática se manifiesta a través de curvas de nivel aproximadamente paralelas, a grandes rasgos coincidentes con las topográficas, indicando una dirección de flujo Oeste-Este, con una inclinación del orden de 1 m cada km (Jensen *et al*, 2000). En la Figura 11 se presenta un mapa de isopiezas de un sector ubicado al Norte del área de estudio.

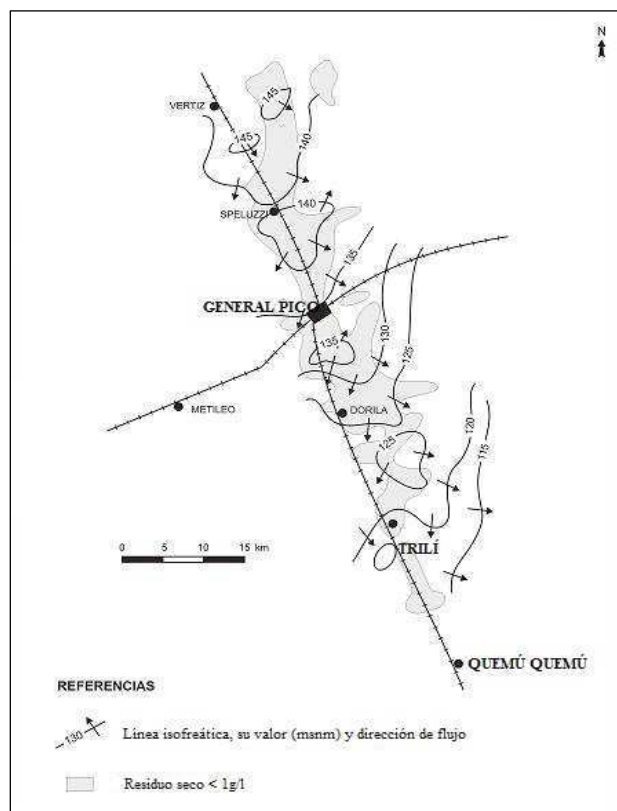


Figura 11: Isopiezas y dirección del flujo subterráneo. Fuente: Giai y Tullio, 1998.

A fin de saber cómo afectan las precipitaciones a la profundidad del nivel freático, se tuvieron en cuenta datos de los tres piezómetros de Quemú Quemú. En la Figura 12 puede observarse cómo variaron los registros de profundidad (en m) de cada piezómetro a través del tiempo y su relación con la precipitación promedio mensual (PP mensual, en mm), para el período 1986-2006. Respecto a lo mencionado en primer lugar, el comportamiento de los piezómetros fue similar a lo largo del tiempo debido a que en los tres coinciden los períodos de disminución o aumento de la profundidad del nivel freático. Particularmente el piezómetro

Nº 1 es el que mayor profundidad registró, entre 6 y 4 m, mientras que en los demás la profundidad fue menor (para el Nº 3 entre 5 y 2 m, y para el Nº 2 entre 4 y 1,5 m de profundidad). En lo referente a las precipitaciones, puede observarse que cuando éstas aumentan, la profundidad del nivel freático disminuye, en tanto que cuando las precipitaciones decrecen, la profundidad del nivel freático es cada vez mayor, registrándose esta variación en los tres piezómetros. Es importante aclarar que la respuesta del nivel freático frente a las precipitaciones no es inmediata en el tiempo, sino que existe un “retraso natural” entre la precipitación caída y la recarga del acuífero debido al tiempo de infiltración del agua de lluvia a través de la zona no saturada (Moscardi C., comunicación escrita).

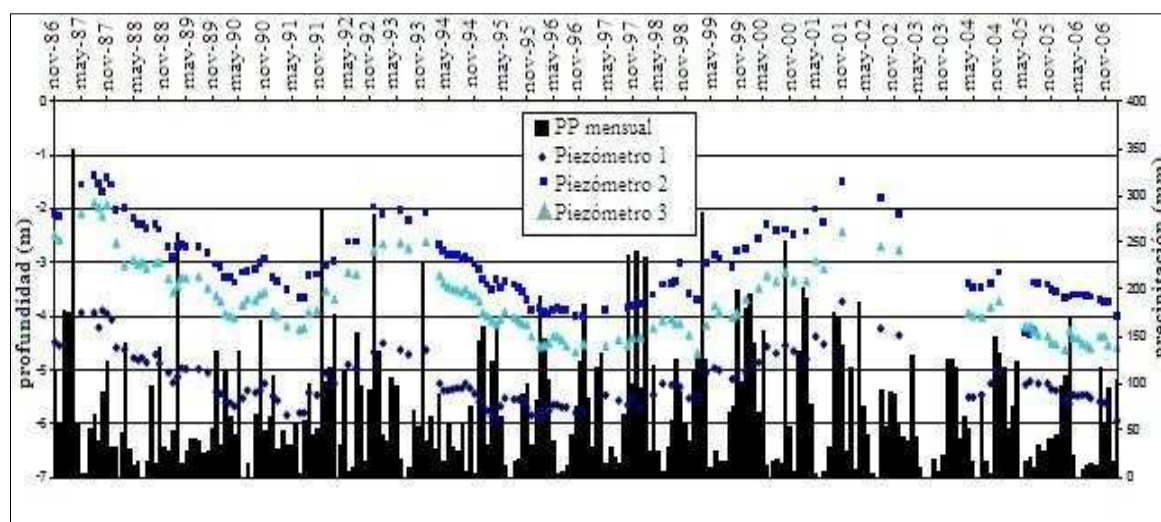


Figura 12: Variación de los niveles piezométricos y precipitación media mensual en Quemú Quemú (1986-2006). Fuente: Moscardi C., comunicación escrita.

4.5. Esquema del flujo subterráneo¹

La Figura 13 pretende representar gráficamente el sistema de flujo subterráneo, como paso preliminar al planteo de un modelo conceptual. Para ello es necesario integrar los conocimientos sobre la climatología, geología y geomorfología, expuestos en los Capítulos 2 y 3 y la información hidrogeológica del presente capítulo. La íntima relación entre estos factores en el área de estudio condicionan la recarga, la permanencia en el terreno y la descarga del agua subterránea, haciendo posible así plantear un esquema de funcionamiento del acuífero. Particularmente, la acción del clima se evidencia cuando la precipitación excede a la

¹ Para la elaboración gráfica de este esquema se utilizaron datos topográficos expuestos en Rodríguez *et al* (2011).

evapotranspiración, lo cual origina excedentes hídricos que, al infiltrarse en el terreno, provocan la elevación del nivel freático. La recarga es únicamente meteórica y ocurre preferencialmente en la zona de médanos, dado por que su litología tienen la capacidad de almacenar aquellos excedentes. De acuerdo con Schulz (2004) si se establece un sistema simple de flujo, existirían tres áreas interconectadas: de recarga, de descarga y de conducción. En la primera de ellas el flujo se comportaría de forma vertical descendente, en la segunda dominaría una componente vertical ascendente y en la última, conectando a las dos anteriores, el flujo es casi horizontal (Figura 13).

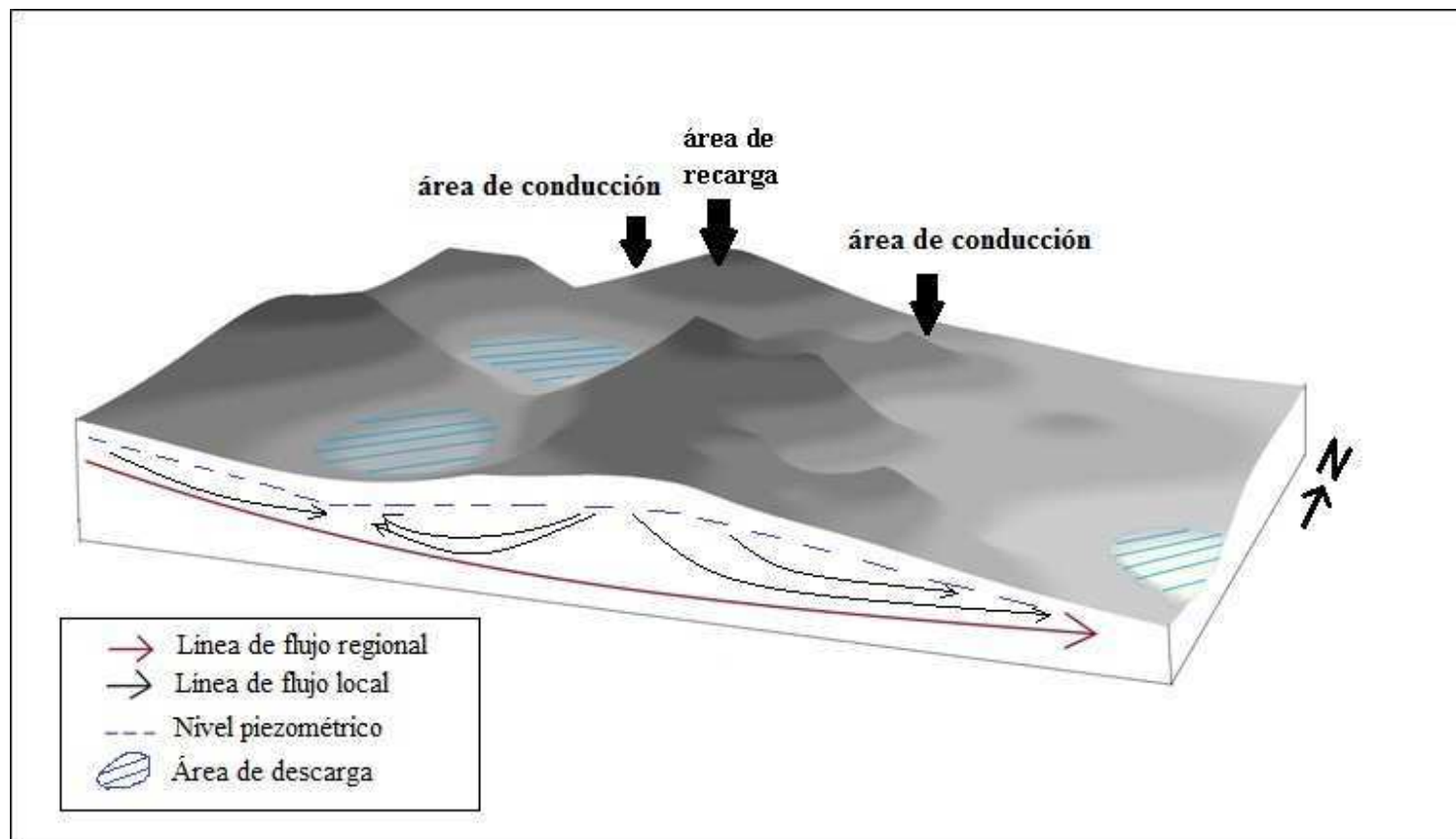


Figura 13: Esquema general de funcionamiento del acuífero. Croquis fuera de escala.

Capítulo 5: HIDROGEOQUÍMICA Y CALIDAD DE AGUA

5.1. Introducción

Según Custodio (1976b) la hidrogeoquímica se limita al estudio de los diferentes elementos químicos del agua (incluyendo su distribución cuantitativa, combinaciones y migraciones) y su relación con las rocas de la corteza terrestre. Durante el recorrido del agua por el subsuelo, desde su infiltración hasta la llegada a las zonas de descarga, se produce una estrecha interacción del agua con el substrato geológico que ha atravesado (Schulz, 2004). Esto condiciona la composición química del agua subterránea que está en directa relación con la composición química del agua de lluvia que infiltró en el terreno, con los procesos que la misma ha sufrido en el espacio y el tiempo, con el tipo de terreno que ha atravesado y con los procesos de mezcla. En este sentido la hidrogeoquímica permite establecer relaciones entre la composición, distribución y circulación del agua en los acuíferos (Escuder *et al*, 2009).

En este capítulo se pretende cumplir con el principal objetivo de la tesina, referido a la caracterización hidrogeoquímica del acuífero, y evaluar posteriormente la calidad del agua subterránea para consumo humano, entre otros usos. Para ello se comienza con una caracterización físico-química del agua de lluvia y del agua subterránea; se presentan las relaciones iónicas y se identifican espacialmente las facies químicas del agua subterránea. El análisis de esta información permitirá relacionar las distintas facies hidroquímicas con el flujo subterráneo en el acuífero bajo estudio.

Respecto a la calidad del agua para consumo humano, el hecho de asegurar su aptitud tiene un beneficio directo sobre el bienestar de la población, por lo que es preciso garantizar este suministro en el tiempo. Muchas de las enfermedades relacionadas con la deficiente calidad y/o cantidad del agua de consumo tienen importantes consecuencias en la salud de las personas, por lo que existen normativas que regulan su adecuado cumplimiento. En este sentido a nivel internacional pueden mencionarse las “Guías para la calidad del agua potable” de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006), cuyo principal objetivo es garantizar la protección de la salud pública y determinar valores de referencia numéricos de los componentes del agua o de los indicadores de la calidad del agua. En el plano nacional, el Código Alimentario Argentino (CAA, 1971) determina los valores de referencia que debe cumplir el agua para consumo humano. De acuerdo con este código el agua potable es aquella “apta para la alimentación y el uso doméstico, no deberá contener sustancias o cuerpos

extraños de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo en tenores tales que la hagan peligrosa para la salud, y deberá presentar sabor agradable y ser prácticamente incolora, inodora, límpida y transparente”. Finalmente en el ámbito provincial la Ley 1027, mediante su Decreto Reglamentario N° 193 del año 1981, establece los parámetros de referencia correspondientes al uso del agua para consumo humano. En la Tabla B.1. del Anexo B se detallan los parámetros de referencia que debe cumplir el agua para consumo humano, según los criterios adoptados por la OMS, el CAA y la Ley Provincial N° 1027. En este trabajo, estas normativas fueron comparadas con los resultados encontrados, y también se analizó la aptitud del agua subterránea para consumo ganadero y para riego.

5.2. Antecedentes

De acuerdo a trabajos previos en el área de estudio (Malán y Schulz, 1988), la alta salinidad (alrededor de 3000 mg/L) coincide con los sectores de descarga y los bajos topográficos, ubicados al Suroeste de Quemú Quemú. Por el contrario, el sector del acuífero que se explota coincide con el área de recarga y aquí el valor promedio es de 1000 mg/L. Respecto a los fluoruros, su concentración varía de 0,6 a 8 mg/L, coincidiendo los valores más bajos con las áreas de recarga; mientras que el arsénico en general presenta altos valores en aquellas zonas donde la salinidad también es alta. Estos tres parámetros (salinidad, fluoruros y arsénico) en el área de los pozos de explotación se mantienen en valores adecuados para consumo humano hasta una profundidad de 26 m, por debajo de la cual se produce un marcado aumento de los fluoruros. Hacia los bajos salinos se insinúa un incremento de la dureza, la cual cuando oscila entre 150 y 350 mg/L ejerce un control sobre los tenores de fluoruros (Schulz, 1997).

5.3. Metodología

5.3.1. Sistema de muestreo del agua subterránea y de lluvias

Las muestras de agua subterránea se obtuvieron a partir de perforaciones existentes en establecimientos rurales donde el principal medio de obtención del agua es a través de molinos y bombas manuales o eléctricas. Se trata en general de perforaciones parcialmente penetrantes, que no superan los 25 m de profundidad. El muestreo fue practicado en mayo de 2011 y se obtuvo un total de 26 muestras: 25 muestras de agua subterránea y se incluyó una muestra de agua superficial de la laguna Bárbulo, localizada al Oeste de Quemú Quemú. De cada

perforación y de la laguna se extrajeron dos muestras; una de ellas destinada a análisis físico-químicos y la otra para determinaciones isotópicas (estas últimas son analizadas en el Capítulo 6). Respecto a las muestras para análisis físico-químicos, se envasaron en recipientes plásticos de 1 litro que se enjuagaron con el agua a colectar, se llenaron sin dejar cámara de aire, y se colocaron en una conservadora portátil, manteniendo una temperatura de refrigeración óptima, cercana a los 4 °C.

Los establecimientos recorridos se dedican a la actividad ganadera o agrícola, en mayor o menor intensidad, y específicamente en donde se extrajeron las muestras N° 2, 24 y 26 se desarrolla la actividad tampera, en tanto que la muestra N° 19 fue extraída de un predio donde tiene lugar el engorde a corral de ganado bovino (feed lot). También se consideraron datos históricos de análisis físico-químicos de los pozos de COSYPRO que fueron provistos por la APA. En la Figura 14 puede observarse la ubicación de los puntos de muestreo y el área donde están los pozos de dicha Cooperativa.

Por su parte, los datos de lluvias corresponden a los utilizados en otra investigación (Wisner L., comunicación escrita), los cuales proceden de muestras colectadas en la “Estación Meteorológica Quemú Quemú” mediante dos colectores de precipitación, integrados en la Red Nacional de Colectores que participa de la GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation). Tales muestras son del año 2008 y, debido a la carencia de datos posteriores, en esta tesina sólo se realizó una caracterización físico-química preliminar del agua de lluvia. Los análisis físico-químicos correspondientes se realizaron en los laboratorios del INGEIS (Instituto de Geocronología y Geología Isotópica).

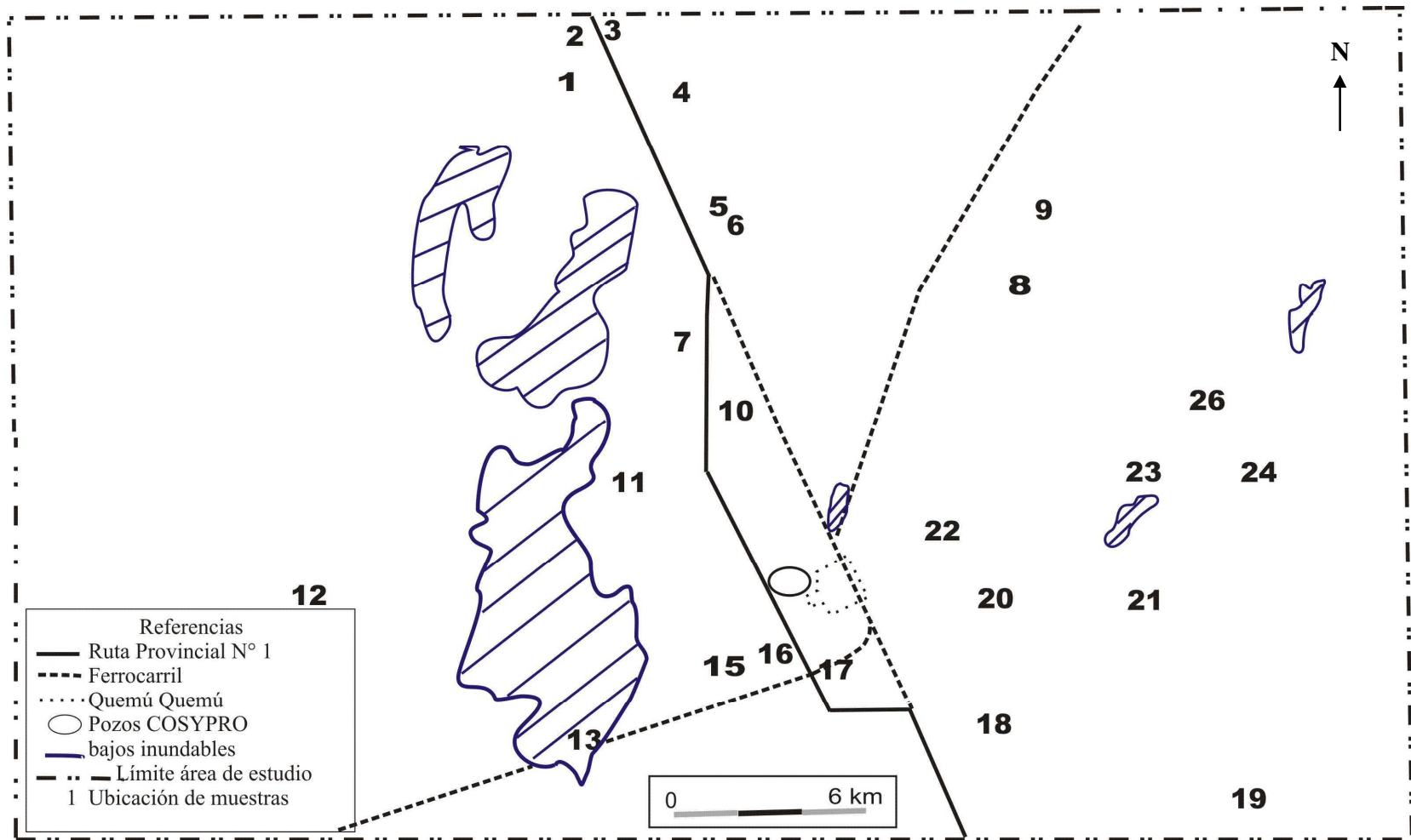


Figura14: Ubicación de las muestras de agua subterránea y de los pozos de COSYPRO. La muestra N° 13 es superficial y pertenece a la laguna Bárbulo, y las muestras N° 14 y 25 no se exponen debido a que fueron extraídas dentro del mismo predio rural que las muestras N° 15 y 26, respectivamente.

5.3.2. Determinaciones físico-químicas de campo

A las muestras extraídas de perforaciones particulares se les midió *in situ* la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), los sólidos disueltos totales (mg/L), la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y el pH a través de medidores potenciométricos portátiles.

5.3.3. Determinaciones físico-químicas de laboratorio

En el laboratorio del Departamento de Ciencias Naturales, de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, se calculó la concentración de cloruros (en mg/L) de la totalidad de las muestras de agua subterránea extraídas de perforaciones particulares. Luego, en el Laboratorio de Aguas de la APA se realizaron análisis físico-químicos completos en ocho de estas muestras, las cuales fueron seleccionadas bajo el criterio de que sean representativas de la zona de médanos, de los bajos topográficos y de las zonas intermedias entre ellas. Se les determinó residuo seco, conductividad eléctrica, pH, alcalinidad, dureza, calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, fluoruros y arsénico, mediante técnicas analíticas convencionales (Anexo C). Es preciso aclarar que sólo se seleccionaron ocho muestras debido a la carencia de recursos económicos para realizar los análisis en la totalidad de ellas.

5.3.4. Elaboración y tratamiento de los datos

La selección de los pozos de COSYPRO estuvo condicionada, principalmente, por la ausencia de determinaciones de los cationes sodio y potasio en determinados pozos o para ciertos años, lo que impidió disponer de datos físico-químicos completos de todos los pozos para el mismo intervalo de tiempo. Además, otro obstáculo fue la falta de determinaciones exactas de arsénico, debido a que la técnica empleada en el laboratorio de la APA no permite la cuantificación en concentraciones menores a los $40 \mu\text{g}/\text{L}$ de arsénico. Estos condicionantes condujeron a que se trabaje con información de:

- Los pozos N° 4, 6, 7 y 10, ya que poseían análisis físico-químicos completos para los mismos años (1995, 1996 y 2009). A partir de sus registros se analizaron las principales relaciones iónicas en el tiempo (planillas de datos en el Anexo B, Tabla B.2.)
- Datos de un muestreo practicado en el año 2009 en los pozos N° 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 que, además de los análisis tradicionales, incluyó la determinación de metales y metaloides, cuyos valores se muestran en la Tabla B.3. del Anexo B, lo cual permitió

plantear relaciones iónicas más específicas (este muestreo en particular fue realizado por COSYPRO, los análisis correspondientes se realizaron en los laboratorios del SEGEMAR, Servicio Geológico Minero Argentino, y las técnicas correspondientes se detallan en el Anexo C). Además, estos datos fueron utilizados para la clasificación hidroquímica y el análisis de las relaciones iónicas en el área donde están los pozos de COSYPRO.

La base de datos de los pozos de la Cooperativa de Quemú Quemú fue complementada con los resultados obtenidos a partir del muestreo practicado por la autora en los alrededores de la localidad. Fundamentalmente, estos resultados fueron empleados para la caracterización espacial del acuífero bajo estudio. Es así que se elaboraron mapas de isovalores de conductividad eléctrica y de isocontenido de cloruros, y también se identificaron espacialmente facies químicas.

Para representar los resultados obtenidos se hizo uso de programas informáticos, tales como el programa Surfer 8 y la planilla de cálculo EASY_QUIM.4.

Finalmente, para evaluar la aptitud del agua para consumo humano se tuvieron en cuenta los datos provenientes de los pozos de COSYPRO que actualmente están en funcionamiento y los obtenidos del muestreo en establecimientos rurales, mientras que para evaluar la aptitud del agua para consumo ganadero y para riego se consideraron los datos provenientes de estas últimas perforaciones.

5.4. Resultados obtenidos

5.4.1. Composición físico-química del agua de lluvia

La precipitación constituye la única fuente de entrada al sistema acuífero, por lo que es necesario tener una aproximación de su composición físico-química. Para ello, en la Tabla 4 se exponen los valores registrados en Quemú Quemú, correspondientes a precipitaciones del año 2008. Dada la fecha de las muestras, tales valores sólo son orientativos ya que sería conveniente disponer de datos de precipitaciones actuales. Luego, en la Figura 15 mediante el uso del diagrama de Piper, se realiza una interpretación aproximada de estos datos. Según el diagrama, cuatro de las muestras son sulfatadas-cloruradas sódicas, otras dos son bicarbonatadas sódicas, y la restante es bicarbonatada cálcica.

Tabla 4: Concentraciones medidas en agua de lluvia. Los valores están expresados en mg/L, a excepción de la Conductividad Eléctrica (C.E.) en $\mu\text{S}/\text{cm}$, y el pH que es adimensional. Fuente: Wisner L., comunicación escrita.

Año 2008	pH	CE	Na^+	K^+	Mg^{+2}	Ca^{+2}	Cl^-	SO_4^{-2}	HCO_3^-
Enero	6,4	10,2	0,33	0,3	0,03	0,26	< 0,5	0,3	1,9
Febrero	6,4	19,4	1,1	0,2	0,03	0,2	1,1	0,57	1,87
Marzo	6,2	31,3	1,7	0,84	0,13	0,75	1,1	3,33	1,9
Mayo	6	14,8	0,3	0,33	0,04	0,25	< 0,5	0,4	1,87
Junio	6,1	31,2	0,9	0,24	0,08	0,62	< 0,5	3,3	1,8
Julio	6,1	38,5	1,1	0,7	0,12	0,87	1,1	3,09	1,87
Agosto	6,2	17,1	0,3	0,1	0,03	0,37	< 0,5	0,6	1,8

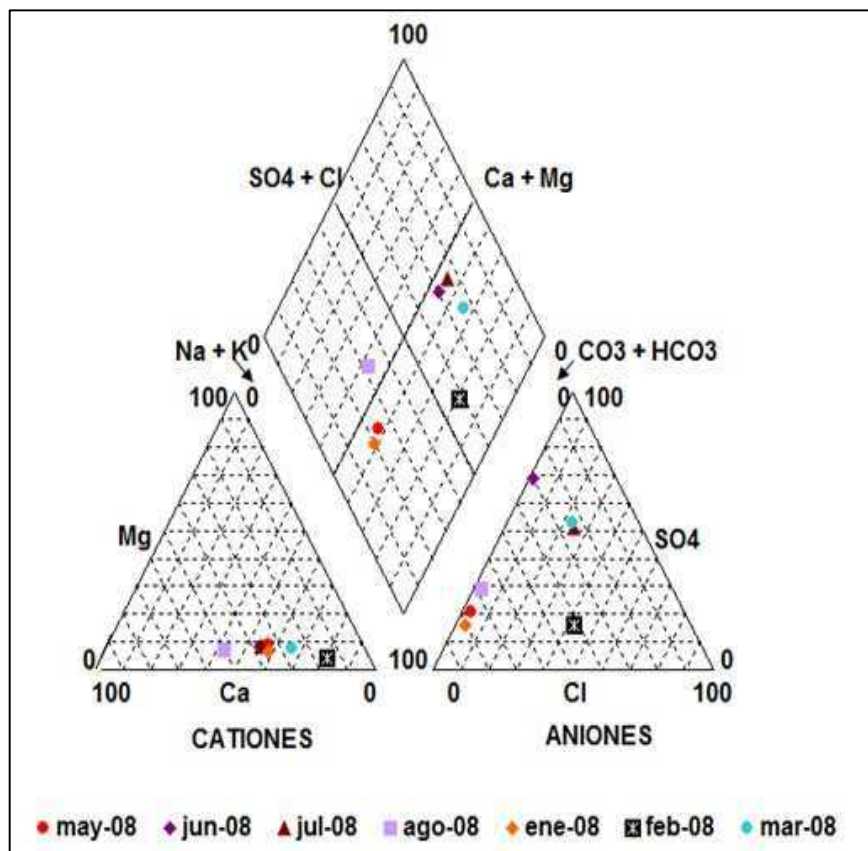


Figura 15: Diagrama de Piper de las precipitaciones de 2008. Fuente: Wisner L., comunicación escrita.

5.4.2. Composición físico-química del agua subterránea

Para caracterizar el agua subterránea se emplearon los datos de los pozos de COSYPRO seleccionados y los obtenidos a partir del muestreo efectuado en el año 2011. Los parámetros obtenidos en este muestreo se detallan en la Tabla 5, donde se especifican los datos

registrados *in situ* en la totalidad de las muestras (conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, ph y temperatura) y los practicados posteriormente en laboratorio. Puede observarse que el 76% de las muestras tienen una conductividad eléctrica (C. E.) menor a 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un promedio de 2304,32 $\mu\text{S}/\text{cm}$; el 84% de las muestras contienen menos de 700 mg/L de cloruros, con una media de 473,52 mg/L; y el 88% de las muestras presentan un valor de pH menor a 8, con una media de 7,32. Respecto a los pozos de COSYPRO con análisis físico-químicos completos, en la Tabla 6 se exponen los resultados para cada pozo según los datos del muestreo de 2009. La interpretación de los datos de las aguas subterráneas se detallará en el apartado 5.5.

Tabla 5: Mediciones efectuadas en la totalidad de las muestras de agua subterránea de perforaciones particulares y en las ocho muestras sometidas a análisis completos, y resumen estadístico de las mismas. Todos los valores están expresados en mg/L, excepto la conductividad eléctrica (C. E.) en $\mu\text{S}/\text{cm}$, el pH es adimensional, y la temperatura (t) en $^{\circ}\text{C}$. SDT: sólidos disueltos totales. A. T.: alcalinidad total. D. T.: dureza total. D. E.: Desvío estándar.

Muestra N°	SDT (ppm)	pH	C. E. (μS)	t $^{\circ}\text{C}$	Residuo seco	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	A. T.	D. T.	Ca ⁺²	Mg ⁺²	F ⁻	Arsénico total	Na ⁺	K ⁺
1	2040,00	7,46	4090,00	18,30	2711,00	570,00	480,90	44,00	868,00	912,00	150,00	16,00	26,70	5,10	0,27	966,00	11,70
2	870,00	7,95	1737,00	19,20		225,00											
3	412,00	8,35	822,00	18,50		105,00											
4	429,00	6,90	862,00	18,00		120,00											
5	760,00	6,82	1523,00	17,70	941,00	60,00	70,30	0,00	412,00	412,00	348,00	60,80	47,60	1,40	< 0,12	92,00	62,40
6	572,00	7,04	1143,00	18,90		135,00											
7	1030,00	7,03	2050,00	18,30		270,00											
8	881,00	8,20	1760,00	17,80		375,00											
9	2160,00	7,78	4320,00	14,80	2891,00	480,00	545,00	60,00	968,00	1028,00	130,00	8,00	26,70	> 8,8	0,27	1012,00	15,60
10	235,00	7,02	470,00	16,90		90,00											
11	1110,00	7,40	2210,00	17,80	1454,00	304,00	205,50	0,00	432,00	432,00	204,00	25,60	34,00	2,14	0,12	391,00	15,60
12	2720,00	6,93	5450,00	16,50	3623,00	970,00	1025,90	0,00	524,00	524,00	310,00	44,00	48,60	3,58	0,05	1242,00	15,60
14	245,00	7,34	490,00	16,50		60,00											
15	754,00	6,89	1508,00	16,10		210,00											
16	664,00	7,03	1329,00	17,10	780,00	56,00	83,00	0,00	388,00	388,00	352,00	64,00	46,70	1,09	< 0,04	92,00	39,00
17	791,00	6,91	1584,00	13,40		240,00											
18	199,90	7,53	1950,00	17,00		255,00											
19	2640,00	7,10	5290,00	16,60		1845,00											
20	4450,00	6,91	8860,00	16,30		3480,00											
21	1150,00	7,48	2300,00	16,40	1521,00	240,00	302,90	0,00	592,00	592,00	248,00	30,40	41,80	1,20	< 0,04	460,00	15,60
22	785,00	7,36	1569,00	16,80	931,00	68,00	122,90	0,00	512,00	512,00	248,00	44,80	33,00	4,46	0,07	207,00	7,80
23	253,00	7,43	506,00	17,40		75,00											
24	983,00	6,81	1965,00	17,60		525,00											
25	511,00	8,30	1020,00	18,50		150,00											
26	1400,00	7,03	2800,00	17,90		930,00											
mínimo	235,00	6,81	470,00	13,40	780,00	60,00	70,30	0,00	388,00	388,00	130,00	8,00	26,70	1,09	< 0,04	92,00	7,80
máximo	4450,00	8,35	8860,00	19,20	3623,00	3480,00	1025,90	60,00	968,00	1028,00	352,00	64,00	48,60	> 8,8	0,27	1012,00	62,40
media	1121,80	7,32	2304,32	17,21	1856,50	473,52	354,55	13,00	587,00	600,00	248,75	36,70	38,14	3,47	0,12	557,75	22,91
D. E.	991,68	0,47	1943,34	1,28	1072,31	742,22	324,26	24,45	216,46	239,83	84,62	20,21	9,19	1,66	0,11	452,84	18,46

Tabla 6: Resumen estadístico de los parámetros de los pozos N° 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 de COSYPRO. Todos los valores están expresados en mg/L, con excepción de la Conductividad Eléctrica (C. E.) en $\mu\text{S/cm}$, el pH que es adimensional, la dureza total (D. T.) y la alcalinidad total (A. T.) como mg/L de CaCO_3 . Mín: valor mínimo. Máx: valor máximo. M: valor medio. D. E.: Desvío estándar.

Pozo	S. D. T.	C. E.	pH	Cl	SO_4^{-2}	HCO_3^-	A. T.	D. T.	Ca^{+2}	Mg^{+2}	F	As	Na^+	K^+
	mg/L	$\mu\text{S/cm}$	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
4	675,00	927,00	8,20	20,00	27,00	375,00	381,00	69,00	13,00	8,80	3,20	0,18	175,00	5,60
6	420,00	530,00	7,70	9,00	11,00	242,00	243,00	121,00	27,00	13,00	<1	0,03	76,00	5,20
7	650,00	878,00	7,70	23,00	29,00	351,00	353,00	135,00	26,00	17,00	1,70	0,06	145,00	6,20
8	775,00	1155,00	8,20	60,00	64,00	401,00	406,00	81,00	11,00	13,00	2,70	0,13	232,00	4,60
9	530,00	658,00	7,80	9,90	13,00	311,00	313,00	130,00	24,00	17,00	1,40	0,04	100,00	5,40
10	450,00	695,00	7,90	16,00	29,00	289,00	291,00	109,00	19,00	15,00	1,60	0,05	117,00	7,00
11	570,00	727,00	7,90	9,60	13,00	361,00	364,00	169,00	20,00	29,00	2,20	0,13	117,00	4,30
12	440,00	572,00	7,70	7,10	9,30	262,00	263,00	122,00	24,00	15,00	1,50	0,02	86,00	4,80
13	270,00	367,00	7,60	10,00	10,00	108,00	108,00	141,00	30,00	16,00	1,50	0,02	20,00	8,40
Mín	270,00	367,00	7,60	7,10	9,30	108,00	108,00	69,00	11,00	8,80	< 1	0,02	20,00	4,30
Máx	775,00	1155,00	8,20	60,00	64,00	401,00	406,00	169,00	30,00	29,00	3,20	0,18	232,00	8,40
Media	531,11	723,22	7,86	18,29	22,81	300,00	302,44	119,67	21,56	15,98	1,98	0,07	118,67	5,72
D. E.	154,61	235,60	0,22	16,57	17,57	89,49	91,09	30,44	6,39	5,51	0,66	0,06	60,92	1,30

5.5. Interpretación de los resultados de agua subterránea

5.5.1. Clasificación hidroquímica

Para la clasificación hidroquímica de las muestras tomadas en los alrededores de Quemú Quemú se realizó el diagrama de Piper (Figura 16). En el mismo puede observarse que en el campo de los cationes el ión sodio domina en la mayoría de las muestras, mientras que en el resto hay un desplazamiento hacia el vértice del magnesio. En el campo de los aniones hay un claro dominio de los bicarbonatos, seguido por los cloruros.

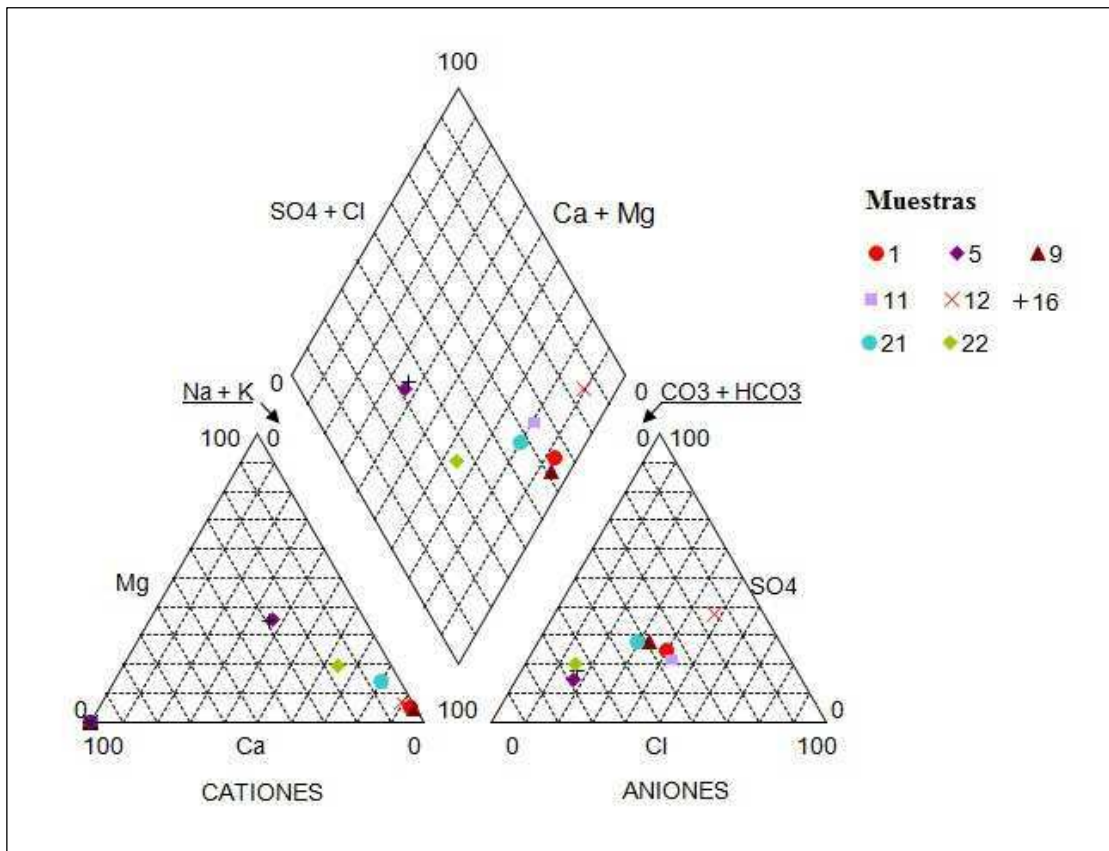


Figura 16: Diagrama de Piper para las muestras de perforaciones particulares.

De la observación de la Figura 16, pueden identificarse los siguientes tipos químicos:

- Bicarbonatada-Sódica/Magnésica (o sin catión dominante), representada por las muestras N° 5 y 16.
- Bicarbonatada-Sódica, donde se encuentran las muestras N° 21 y 22.
- Sódica sin anión dominante, representada por las muestras N° 1, 9 y 11.
- Clorurada/Sulfatada-Sódica, que corresponde a la muestra N° 12.

Para detallar la relación entre estas muestras y los distintos sectores del acuífero, las mismas se diferenciaron según sus valores de residuo seco (Tabla B.4., Anexo B). En base a este análisis, las muestras N° 5, 16 y 22 son representativas del sector de recarga dado sus bajos tenores salinos; las muestras N° 11 y 21 están vinculadas a una conducción incipiente ya que presentan mayor concentración en sodio, cloruros y sulfatos que las muestras anteriores; por su parte, las muestras N° 1 y 9 están ligadas a zonas de conducción porque presentan mayor concentración en sodio y en los aniones principales que las muestras precedentes; y la muestra N° 12 es representativa del sector de descarga puesto que presenta la mayor evolución

en aniones y cationes de las ocho muestras.

Complementario al diagrama de Piper (Figura 16) a continuación se presenta el diagrama de Schoeller-Berkaloff (Figura 17) para las mismas muestras, donde puede apreciarse mejor el carácter del sodio como catión dominante en el 100% de las muestras, aunque en las muestras N° 5 y 16 la concentración de este catión es levemente superior a la de magnesio. En el campo de los aniones, los cloruros son claramente dominantes en la muestra N° 12; las N° 1, 9 y 11 no tienen un anión dominante, mientras que en el resto de las muestras dominan los bicarbonatos.

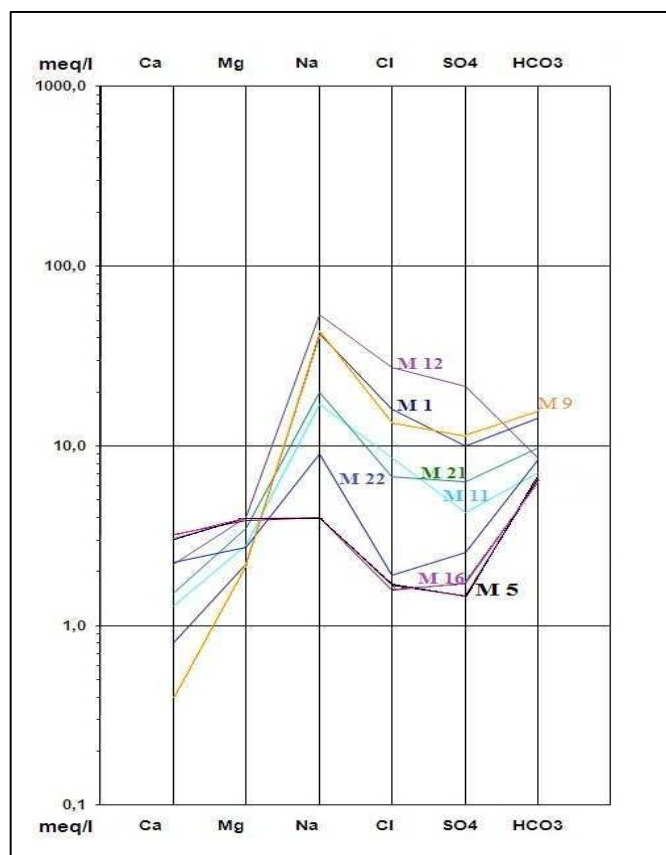


Figura 17: Diagrama de Schoeller-Berkaloff para las muestras (M) de perforaciones particulares.

En el caso de los pozos de COSYPRO, en la Figura 18 se presenta el diagrama de Piper para los resultados obtenidos. En esta oportunidad puede observarse que la mayoría de las muestras son bicarbonatadas sódicas, a excepción de la muestra del pozo N° 13 que es de tipo bicarbonatada cálcica/magnésica. Una posible explicación es que el pozo 13 es un pozo más nuevo que los demás en cuanto a tiempo de funcionamiento, por lo que aún no han tenido lugar procesos modificadores de la composición química del agua, como pueden ser procesos

de mezcla de aguas o el intercambio catiónico.

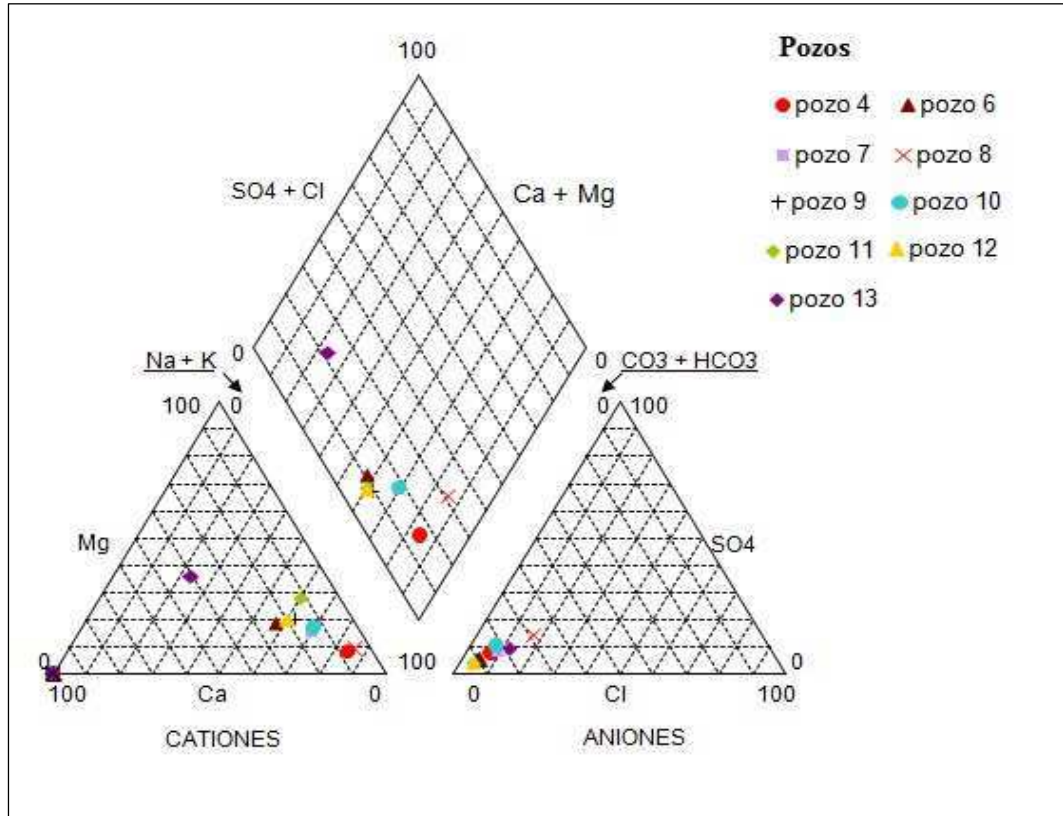


Figura 18: Diagrama de Piper para los pozos N° 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 de COSYPRO.

5.5.2. Variación temporal de las relaciones iónicas

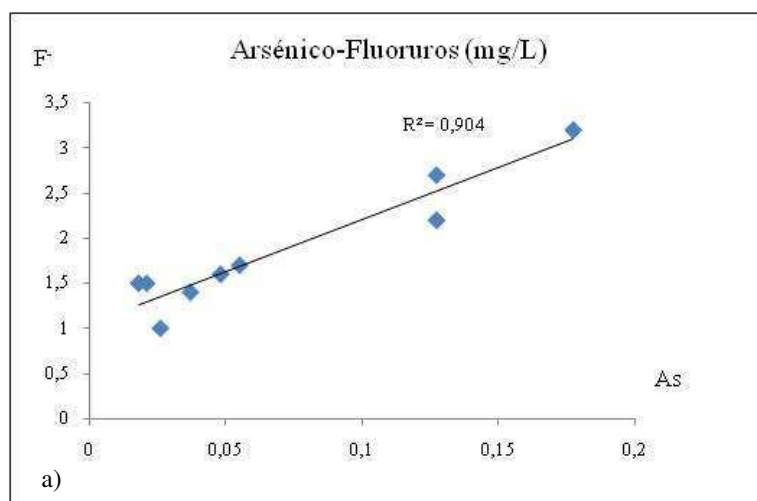
Con los datos de los pozos N° 4, 6, 7 y 10 de COSYPRO se observó cómo variaron algunas relaciones en el tiempo. Los resultados se exponen en la Tabla 7 donde es notoria la dominancia del sodio respecto a los demás cationes para los tres años analizados, incluso pareciera que con el transcurso de los años las diferencias van en aumento. La dominancia de este catión también se evidencia en el Índice de cambio de bases (icb, Custodio, 1976b), dado que valores negativos como los que se registraron en los pozos, indican una superioridad de las bases de ablandamiento (sodio y potasio) por encima de las bases de endurecimiento (calcio y magnesio). En el campo de los aniones, los bicarbonatos dominan claramente por sobre los cloruros. La baja relación cloruros/bicarbonatos se explica por la localización de los pozos de COSYPRO, que están en una zona de médanos donde el agua aún no ha tenido tiempo suficiente para incorporar sales.

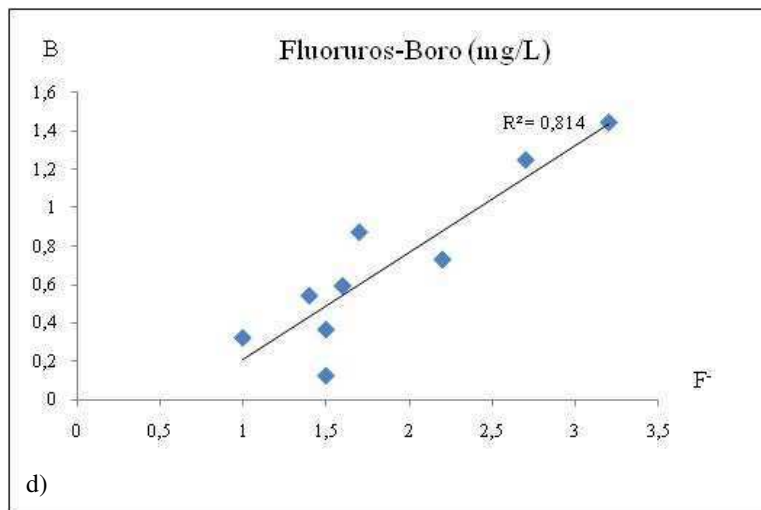
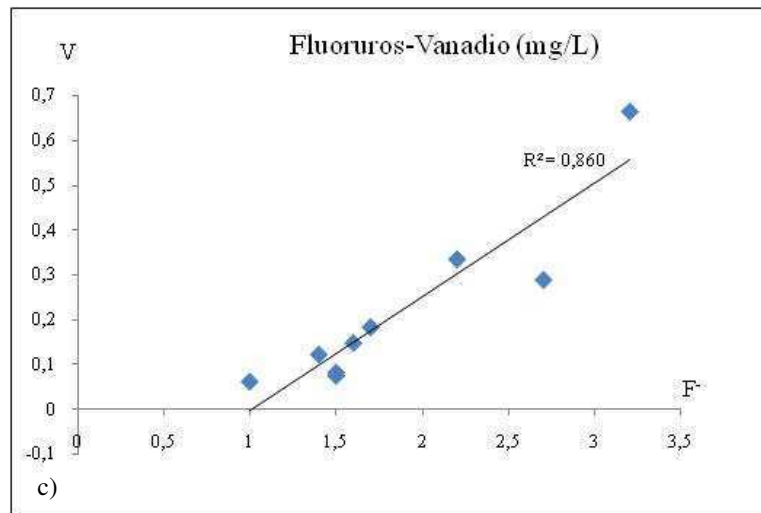
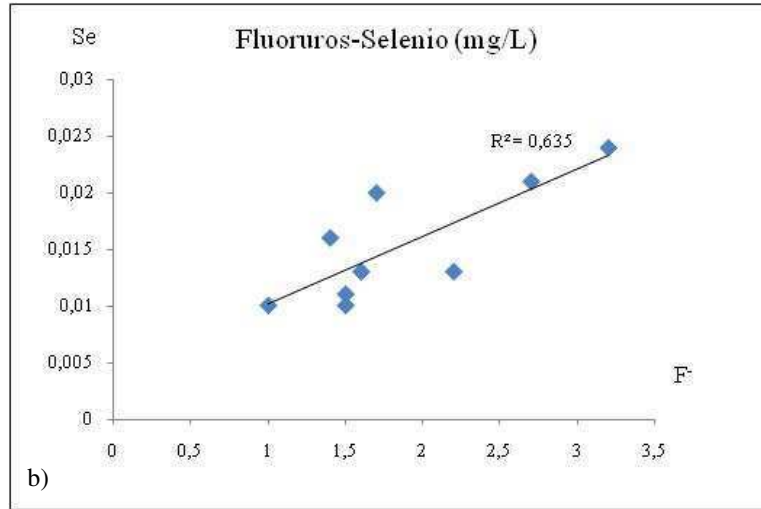
Tabla 7: Relaciones iónicas, expresadas en Meq/L. $icb = rCl^- - r(Na^+ + K^+)/rCl^-$

AÑO	1995	1996	2009
rNa^+/K^+	12,88	14,00	37,20
rNa^+/Ca^{+2}	3,43	3,21	5,26
rNa^+/Mg^{+2}	2,66	2,46	4,98
rMg^{+2}/Ca^{+2}	1,29	1,30	1,06
rSO_4^{-2}/Cl^-	1,59	3,60	1,04
rCl^-/HCO_3^-	0,14	0,11	0,09
icb	-7,48	-7,33	-10,94

5.5.3. Relaciones del arsénico y los fluoruros con metales y metaloides

Los análisis efectuados en el año 2009 por la Cooperativa aportaron datos sobre elementos prácticamente inéditos en la base de datos consultada, tales como manganeso, cadmio, cinc, berilio, vanadio, cobalto, plata, selenio, etc. (Anexo B, Tabla B.3.). Es por ello que resultó interesante plantear las relaciones iónicas entre los fluoruros y el arsénico con estos metales y metaloides, debido a que, por la litología del área de estudio, estos elementos estarían estrechamente vinculados (Cabrera *et al*, 2005). En las Figuras 19a) a 19g) se exponen las relaciones más importantes.





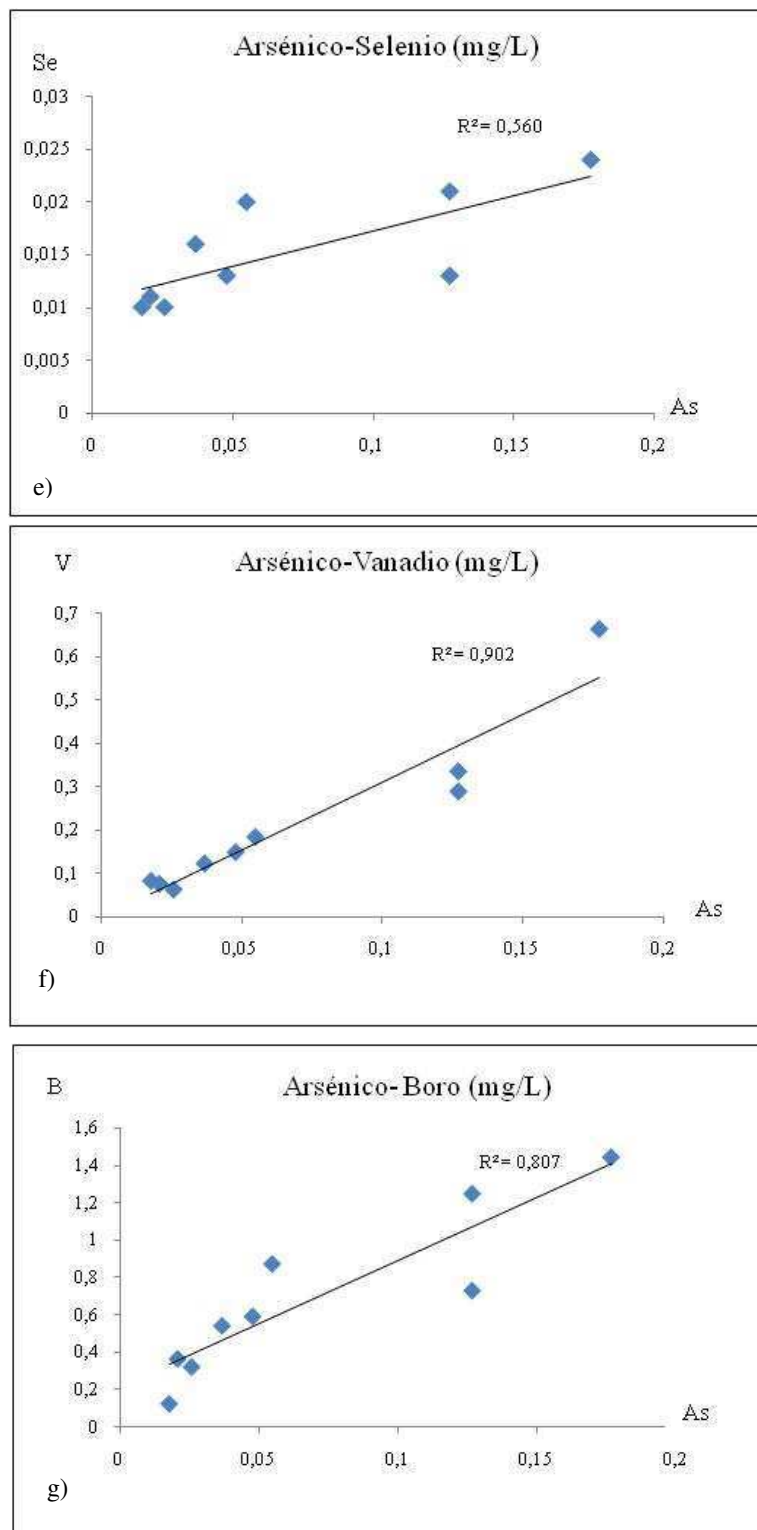


Figura 19: Relaciones iónicas de los fluoruros y el arsénico. a) Arsénico-Fluoruros. b) Fluoruros-Selenio. c) Fluoruros-Vanadio. d) Fluoruros-Boro. e) Arsénico-Selenio. f) Arsénico-Vanadio. g) Arsénico-Boro.

Del análisis de estos gráficos se desprende que existe una importante relación entre la concentración de fluoruros y arsénico, y que ambas aumentan conforme lo hacen las correspondientes a las de vanadio y boro, y con menor intensidad con el selenio. Algunos autores (Auge, 2009) relacionan la presencia de estos elementos en el agua subterránea con la composición de los sedimentos loésicos presentes en el área de estudio. Dicha cubierta está formada por sedimentos que provienen de la Cordillera de Los Andes; presenta intercalaciones de cenizas volcánicas con vidrio del mismo origen, el que aparece como uno de los principales generadores del arsénico en el agua subterránea. En este sentido, de acuerdo con las descripciones mineralógicas del loess de la región (Mariño, 2003), en la fracción arenosa los constituyentes más importantes son el cuarzo, los feldspatos alcalinos, las plagioclasas y los minerales máficos. Estos minerales liberan sílice, sodio, calcio y magnesio, según una secuencia que depende del grado de susceptibilidad a la meteorización de cada mineral y de su estado de equilibrio con la fase acuosa (índice de saturación). En la fracción limo 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, sodio, sílice, potasio, arsénico, vanadio, entre otros, mientras que los cationes bivalentes son retenidos más fuertemente en su estructura (Bonorino *et al*, 2008).

5.5.4. Variación espacial

5.5.4.1. Relaciones iónicas

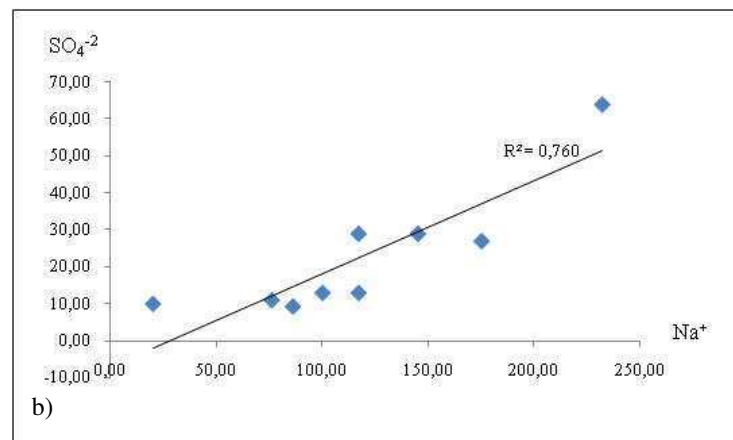
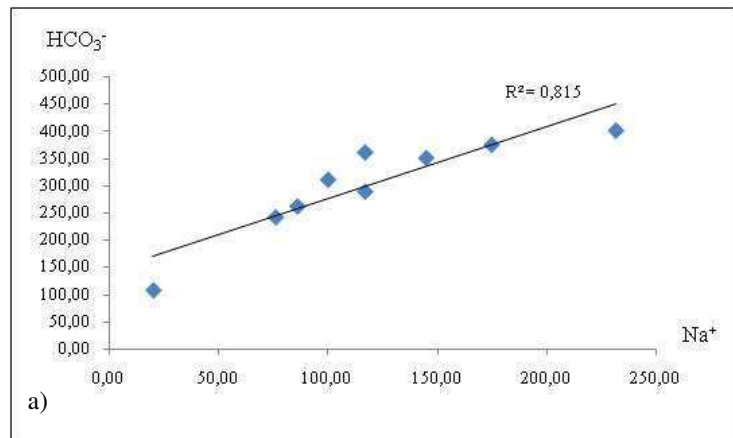
La relación entre las principales variables hidroquímicas del agua subterránea tomadas de a pares se analizó mediante el método de correlación parcial, basada en calcular una matriz de coeficientes de Pearson que se obtuvieron a partir de la planilla de cálculo Excel. Los mismos se aproximan a +1 o -1 cuando existe una alta vinculación directa o inversa, respectivamente. No pudo fijarse el valor crítico del coeficiente debido a que la cantidad de muestras es inferior a la cantidad de variables, por lo que las conclusiones se basaron en la aproximación a +1 o a -1.

Según la información de los pozos N° 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 de COSYPRO (ver coeficientes en Tabla B.5. del Anexo B), existe una relación directa entre:

- Los sólidos disueltos totales con los aniones principales, los fluoruros y el sodio.

- El sodio con los bicarbonatos, sulfatos y cloruros (Figura 20a, b y c).
- El arsénico y los fluoruros entre sí.

Entre las relaciones inversas se encuentran el calcio respecto a los aniones principales, el sodio, los fluoruros y el arsénico. Además existe una leve tendencia hacia una relación inversa entre la dureza y los fluoruros, cuyo comportamiento se muestra en la Figura 20d.



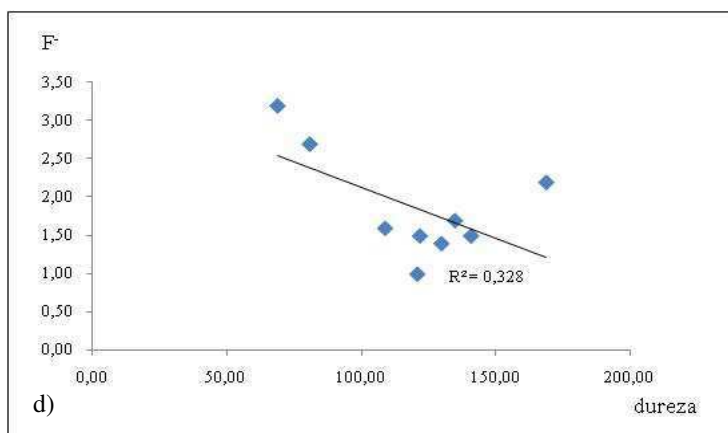
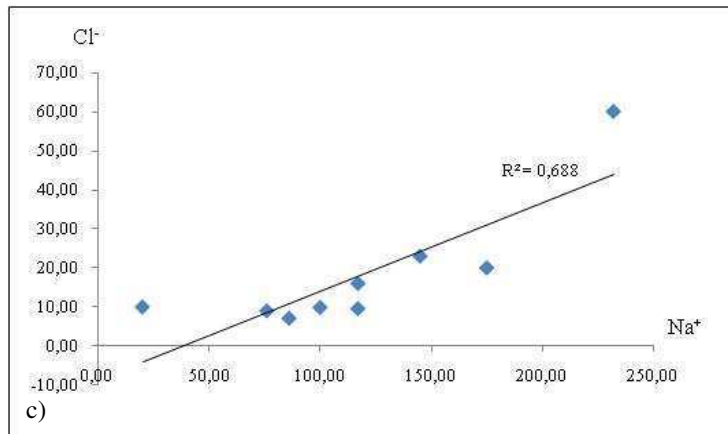


Figura 20: Relaciones iónicas de los pozos de COSYPRO N° 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13. a) Sodio-Bicarbonatos. b) Sodio-Sulfatos. c) Sodio-Cloruros. d) Dureza-Fluoruros. Todos los valores están expresados en mg/L.

Respecto a las relaciones iónicas para las muestras de perforaciones particulares (ver coeficientes en Tabla B.6. del Anexo B), las relaciones directas estadísticamente más importantes se establecen entre:

- El residuo seco con los cloruros, sulfatos, sodio y fluoruros.
- El sodio con los aniones principales.
- Los bicarbonatos con los fluoruros y el sodio.
- La dureza con el calcio y el magnesio, prácticamente con igual coeficiente (0,96932108 y 0,94414661, respectivamente). No se registraron cambios en la relación dureza-fluoruros respecto a los pozos de COSYPRO, la cual mantiene una tendencia inversa (Figura 21).

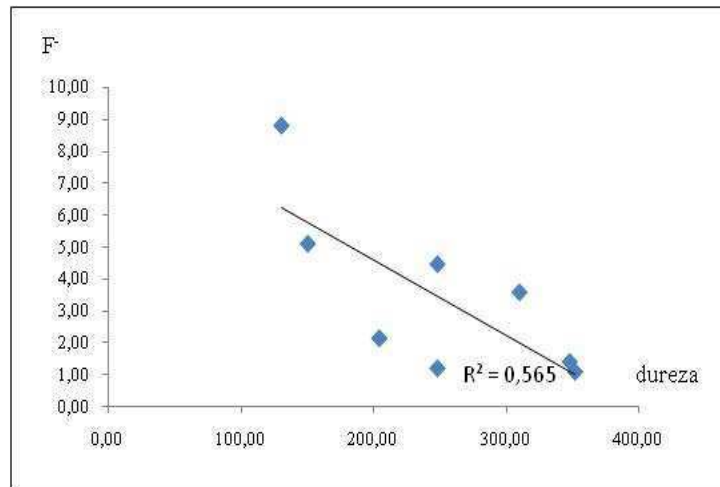


Figura 21: Relación Dureza (mg/L de CaCO₃)-Fluoruros (mg/L) de las muestras de perforaciones particulares.

5.5.4.2. Distribución espacial de la conductividad eléctrica y de los cloruros

Los datos de C. E. (registrados *in situ*) y de cloruros (determinados en laboratorio) de las muestras provenientes de perforaciones particulares permitieron la elaboración de un mapa de isovalores de conductividad eléctrica (Figura 22) y de isocontenido de cloruros (Figura 23), respectivamente. Dada la gran diferencia en estos valores en las muestras que se extrajeron del mismo predio (N° 14 y 15, y N° 25 y 26), y la imposibilidad de representar en el mapa valores tan disímiles en un espacio tan pequeño, se optó por considerar el promedio entre los dos valores. Para la elaboración de los mapas se agregaron además los datos promedios de los pozos de la batería de COSYPRO del año 2009.

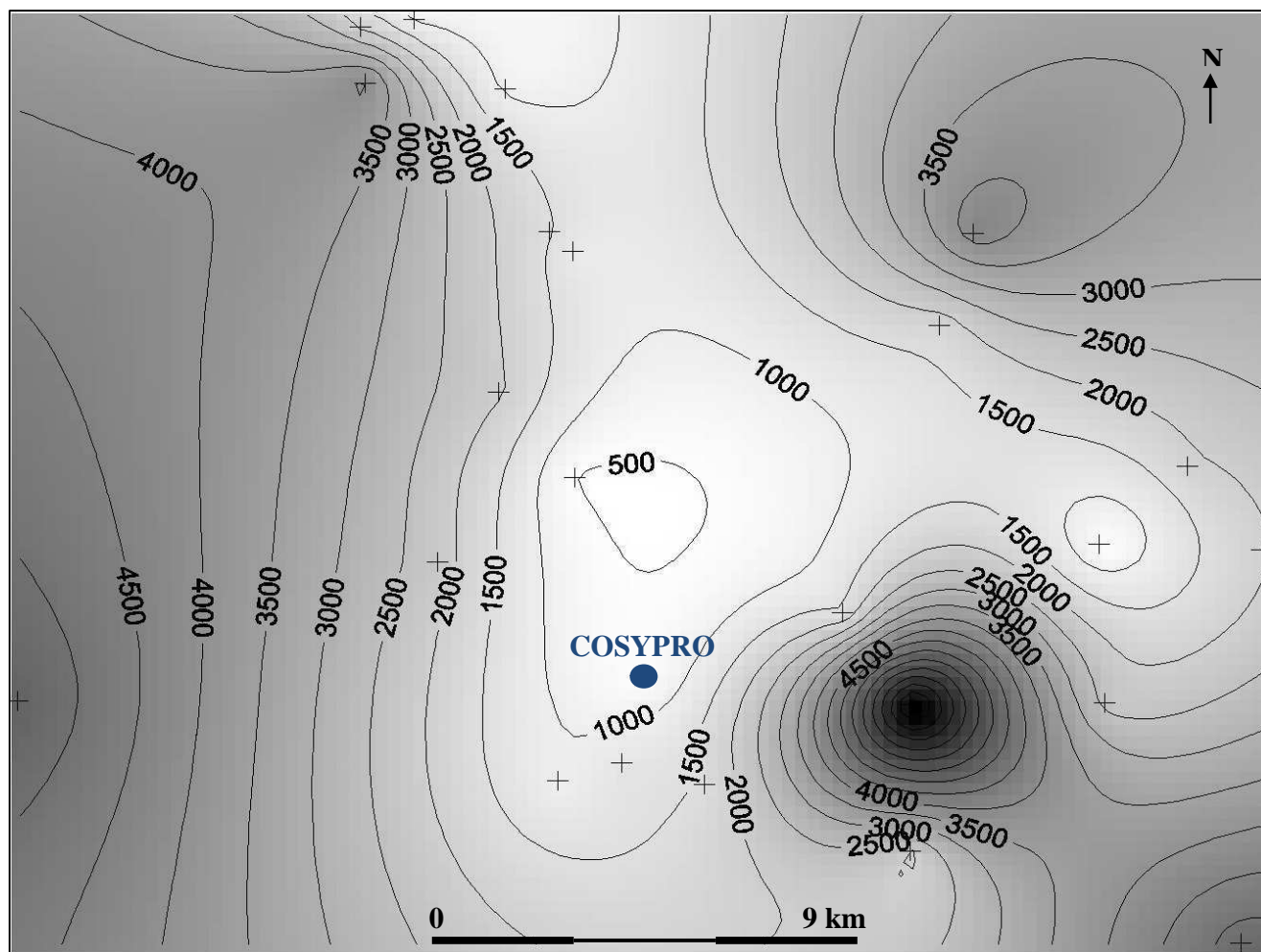


Figura 22: Mapa de isovalores de conductividad eléctrica (en $\mu\text{S/cm}$) en base a los datos registrados “*in situ*” en las muestras de perforaciones particulares y promedio de los pozos de COSYPRO.

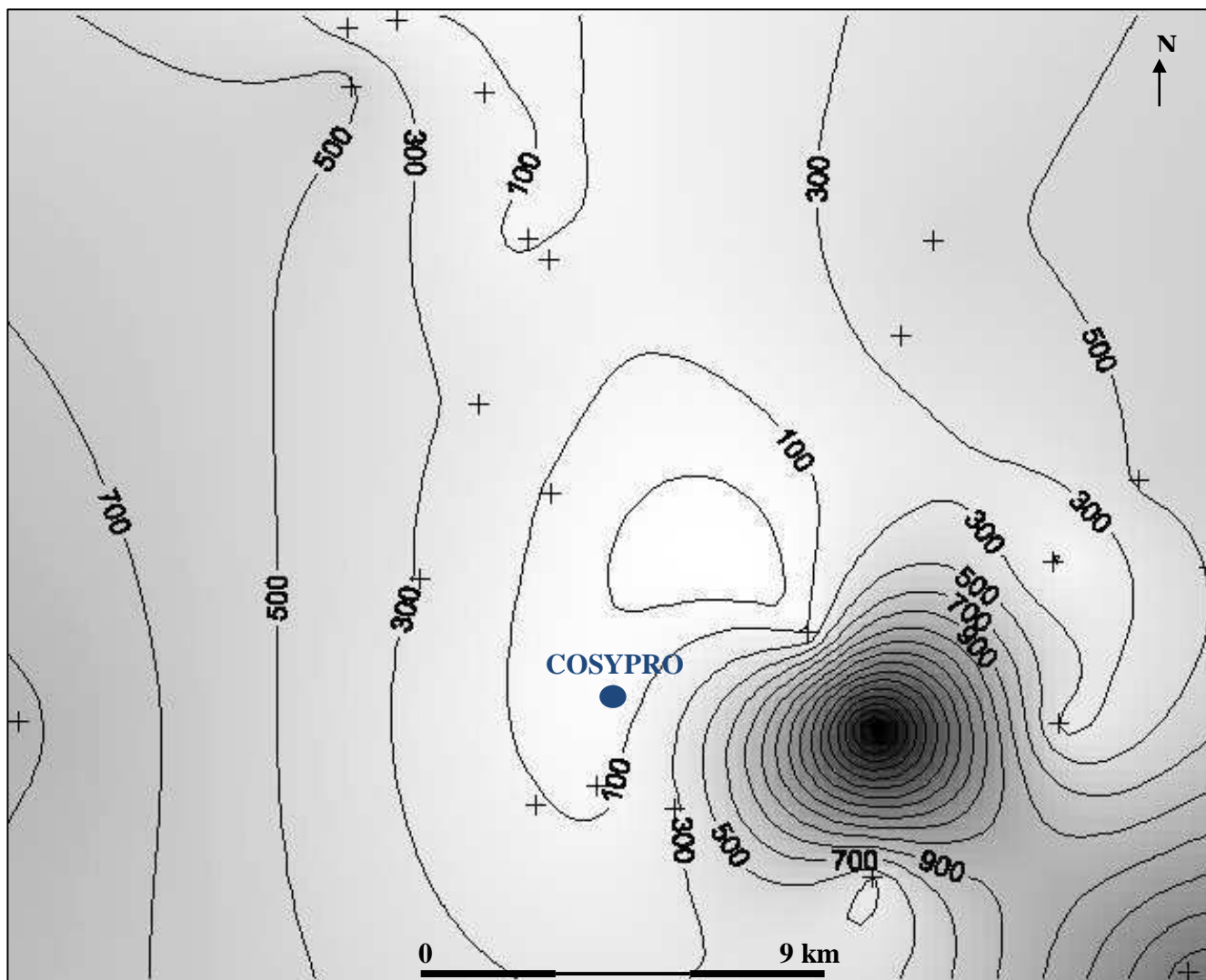


Figura 23: Distribución espacial de los cloruros (en mg/L) en base a las concentraciones medidas en las muestras de perforaciones particulares y promedio de los pozos de COSYPRO.

Estos mapas evidencian que hacia el Sureste de Quemú Quemú existe un marcado incremento de la C. E. y de los cloruros, mientras que hacia el Suroeste y Noreste también existe un incremento, pero de menor magnitud. Dado que la C. E. es un buen indicador de la salinidad, puede afirmarse que este parámetro aumenta desde las zonas topográficamente más elevadas (médanos) hacia las zonas deprimidas del terreno, donde se registra un incremento en el contenido de sales. En los alrededores de estos bajos salinos se encuentran establecimientos con importante densidad ganadera (tambos, muestras N° 24 y 26, y feed lot, muestra N° 19) que puntualmente podrían aportar excesos de sales.

Para tener mayor detalle de estos incrementos, se observó cómo variaron espacialmente algunas relaciones entre los iones mayoritarios en las muestras de perforaciones particulares y en los pozos COSYPRO. Al respecto se puede decir que:

- La relación $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ es baja a lo largo de una línea aproximadamente vertical que pasa por el centro del área de estudio (muestras N° 5, 16, 22 y pozos de COSYPRO) y luego esta relación aumenta hacia el Este (muestras N° 9 y 21) y Oeste (muestras N° 1, 11 y 12) de esta línea. En el caso de la muestra N° 12, en el campo aniónico, también toman importancia los sulfatos.

- Lo mismo sucede con la relación $\text{Na}^+/\text{Ca}^{+2}$, la cual es baja en aquella línea central, y aumenta en dirección Este y Oeste, sucediendo esto en las mismas muestras de la relación anterior.

La variación espacial de estas relaciones se expone en la Figura 24. En la misma se aprecia que el aumento en los cloruros se acentúa hacia el Suroeste de la localidad, aunque esta situación no es bien marcada en el mapa de isocontenido de cloruros, más bien en este mapa el fuerte aumento de cloruros se observa en dirección Sureste (puntualmente la muestra N° 20 tiene la máxima concentración registrada, de 3480 mg/L). La explicación de esta falta de correspondencia puede estar dada por la baja densidad de muestras hacia el sector Suroeste, y con la falta de muestras con análisis completos en general.

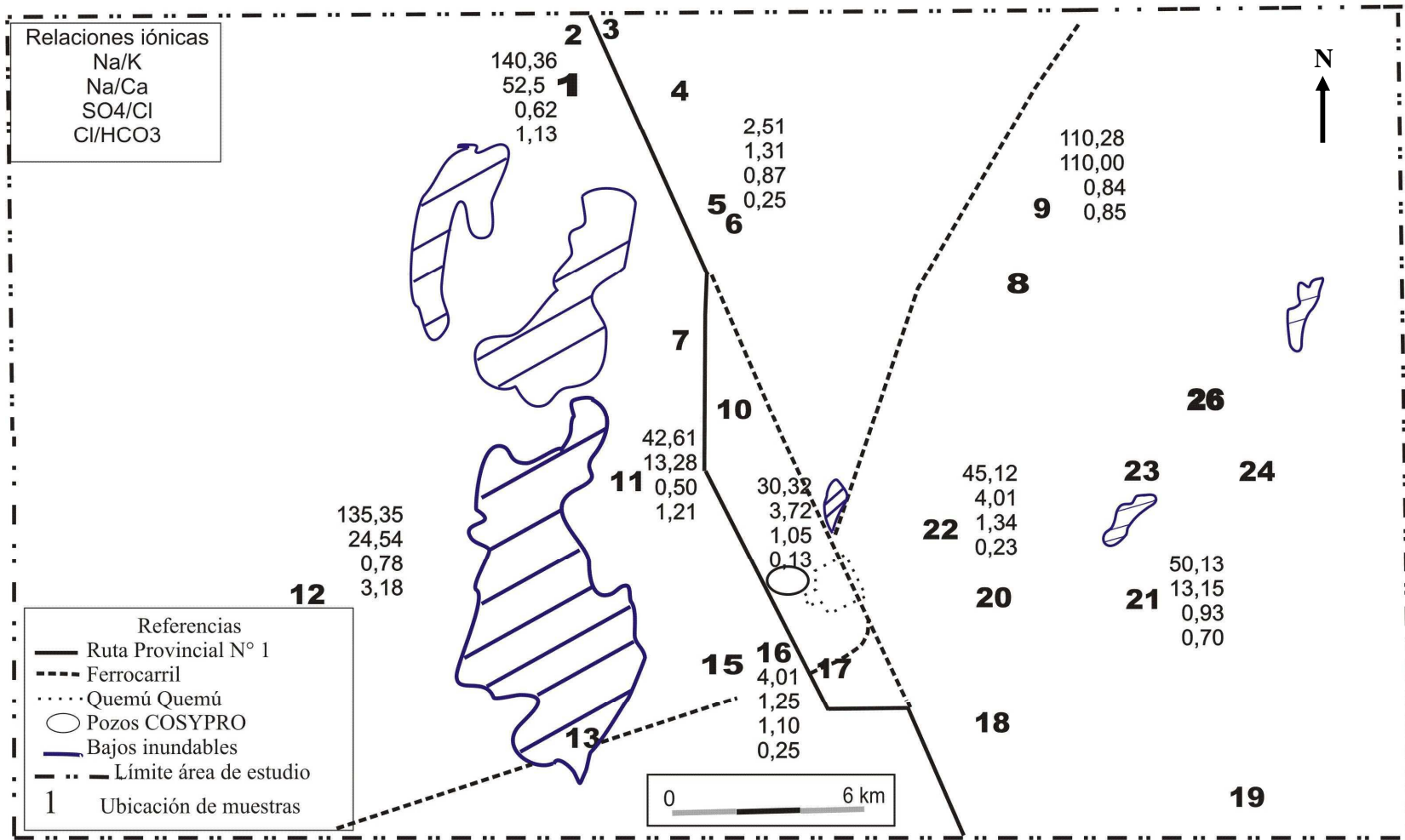


Figura 24: Variación espacial de las relaciones iónicas: Sodio/Potasio, Sodio/Calcio, Sulfatos/Cloruros y Cloruros/Bicarbonatos. Todos los valores están expresados en Meq/L.

5.6. Clasificación del agua para los distintos usos

La población de Quemú Quemú y sus alrededores explota el acuífero para satisfacer sus necesidades hídricas, ya sea para consumo humano, animal o para riego. A fin de evaluar la aptitud del agua para consumo humano en la localidad se tuvieron en cuenta los parámetros de los pozos de COSYPRO que actualmente están en funcionamiento, a partir de los datos expuestos en la Tabla 6, con la salvedad que no se incluyeron los datos del pozo 8 porque actualmente está fuera de servicio. Luego, con los resultados obtenidos del muestreo en perforaciones particulares (Tabla 5), se evaluó no sólo la aptitud del agua para consumo humano, sino también para consumo animal y para riego, dada la importancia del agua como insumo para la producción agropecuaria. En ambos casos, pozos de COSYPRO y perforaciones particulares, los parámetros obtenidos se compararon con los parámetros de referencia fijados por la OMS, el CAA y la Ley Provincial N° 1027. Como se apreciará posteriormente, en esta comparación no se incluyeron los nitratos porque en los análisis de 2009 de los pozos de COSYPRO no se hace discriminación entre nitritos y nitratos, y en los análisis de las perforaciones particulares no se determinaron estos iones. Sin embargo, antecedentes sobre nitratos en la localidad pueden encontrarse en Iribarra (2006).

5.6.1. Consumo humano

Los resultados obtenidos en los pozos de COSYPRO se ajustan a las distintas reglamentaciones, salvo algunos pozos que exceden su contenido en fluoruros y arsénico. Específicamente, este último se encuentra por encima de lo permitido por la OMS y el CAA en todos los casos, mientras que para la Ley Provincial todos los pozos cumplen con lo establecido. Respecto a los fluoruros, se hallan en exceso en los pozos N° 4, 7, 10 y 11 si se considera la OMS; según el CAA, a excepción del pozo N° 6, en los demás su concentración está por encima de lo reglamentado; y para la Ley N° 1027, los pozos N° 4 y 11 no cumplen con la normativa. Además puede observarse que, a partir de los datos sobre metales y metaloides, el boro y el selenio se presentan en una concentración superior al límite apto para consumo humano de acuerdo con las distintas reglamentaciones.

Es importante aclarar que la Cooperativa realiza una mezcla del agua proveniente de los distintos pozos, por lo que la población no consume directamente el agua de un pozo en particular.

Teniendo en cuenta los resultados del muestreo de 2011, si se considera la concentración de cloruros obtenida en la totalidad de las muestras, según el CCA el 32% de las mismas exceden la tolerancia de este anión, y para la Ley 1027 lo exceden el 16% de las mismas. Respecto a las ocho muestras con análisis físico-químicos completos, puede decirse que:

- La alcalinidad total en el 87,5% de los casos y la dureza total en el 62,5% de los casos, superan lo fijado por la Ley Provincial.
- El 37,5 % de las muestras superan el límite máximo para residuo seco y para sulfatos, según la Ley N° 1027, y para cloruros, según el CAA, tratándose de las mismas muestras que exceden los tres límites (muestras N° 1, 9 y 12).
- Todas las muestras contienen tenores de arsénico por encima de los límites del CAA y la OMS, y si se considera la Ley 1027, sólo las muestras N° 1 y 9 son las que exceden estos límites.
- Los fluoruros están fuera del límite apto para las tres normativas en cinco de las ocho muestras (62,5%).

En base a estos resultados y contemplando sólo la normativa provincial, en la Tabla 8 se detallan las muestras que no se ajustan a la misma. Así, las N° 1 y 9 son las más comprometidas para consumo humano, ya que exceden los límites máximos de fluoruros (5,1 y > 8,8 mg/L, respectivamente), arsénico (0,27 en ambas muestras), sulfatos (480,9 y 545 mg/L, respectivamente), bicarbonatos (868 y 968 mg/L, respectivamente) y residuo seco (2711 y 2891 mg/L, respectivamente). La muestra N° 12 tiene en exceso los mismos elementos, a los cuales tiene que sumarse el exceso de cloruros, aunque en lo referente a la concentración de arsénico, la misma está dentro de los límites permisibles. Las muestras N° 11 y 22 sólo tienen exceso de fluoruros, manteniéndose los demás parámetros en general aptos para consumo humano, mientras que las muestras N° 5, 16 y 21 serían las que más se ajustan a los requisitos de la normativa provincial.

Tabla 8: Detalle de las muestras de perforaciones particulares que no cumplen con la Ley 1027 para consumo humano.

Parámetro (mg/L)	Cantidad de muestras por encima del límite apto	Muestras N°
Arsénico	2	1 y 9
Alcalinidad de Bicarbonatos	7	1, 5, 9, 11, 12, 21 y 22
Cloruro	1	12
Dureza total	5	5, 12, 16, 21, y 22
Fluoruros	5	1, 9, 11, 12 y 22
Sulfato	3	1, 9 y 12

5.6.2. Consumo ganadero y riego

En el Anexo B, Tabla B.7., se especifican los parámetros que debe cumplir el agua para consumo animal, según Bavera *et al* (1979), y en la Figura B.1. del mismo Anexo se exhibe la clasificación de las aguas subterráneas para riego, dada por el U.S. Salinity Laboratory Staff (1954), teniendo en cuenta los valores medidos en las perforaciones particulares. En base a los datos obtenidos, puede decirse que:

- Tanto para bebida de ganado de cría como para tambo, en el 64% de las muestras el bajo contenido de sales totales genera que la calidad del agua sea deficiente. En el resto de las muestras, para cría de bovino el agua pertenece a las categorías muy buena y buena, mientras que al tambo le corresponden las categorías buena y aceptable, siendo los elevados tenores de sulfatos el factor que más restringe este uso. En general, es aconsejable el empleo del agua para la producción ganadera.

- Para riego la mayor limitación la impone el peligro de salinización del suelo, ya que tres de las muestras tienen muy alto valor, en otras tres el peligro es alto, y en las dos restantes el peligro es entre alto y muy alto. En cuanto al peligro de alcalinización, el mismo es bajo en dos muestras, medio en una, alto en dos y en las tres restantes es muy alto. En este caso, el empleo del agua para riego está muy condicionado por su potencialidad de salinizar los suelos, por lo que sería necesario realizar riegos periódicos adecuados para el lavado de sales.

5.7. Definición de las facies hidroquímicas

De acuerdo con Mariño (2003), un modelo hidrogeoquímico conceptual es una representación simplificada del sistema, en el cual las modificaciones espaciales de la composición del agua se explican por la ocurrencia de procesos que actúan sobre el agua de lluvia durante su circulación por el acuífero. En la presente tesina, debido a la carencia de información detallada y actualizada sobre las lluvias, por el momento no podría establecerse una consistente relación entre su composición química y la del agua subterránea. Sin embargo, sí es posible entender cómo las condiciones naturales de la zona, especialmente la geología y la geomorfología, influyen en la caracterización hidrogeoquímica del acuífero. En este sentido, luego de la infiltración del agua de lluvia en las zonas de recarga, el agua subterránea experimenta importantes reacciones en su camino hacia las zonas de descarga (bajos topográficos) que modifican su composición. Según los resultados obtenidos, la zona con más evidencias de aguas de recarga se extiende a lo largo de una línea vertical que pasa por el centro del área de estudio, coincidiendo con el cordón medanoso, donde las aguas son predominantemente bicarbonatadas-sódicas/magnésicas y bicarbonatadas sódicas. Hacia los laterales de esta línea, en coincidencia con los sectores bajos del relieve, hay una evolución de las facies químicas evidenciada por el aumento de las sales, según pudo comprobarse en los mapas de isovalores de conductividad eléctrica y de isocontenido de cloruros (Figuras 22 y 23). Específicamente, en las áreas de conducción se encuentran facies bicarbonatadas-sódicas y sódicas sin anión dominante; mientras que hacia las áreas de descarga evolucionan hasta facies cloruradas/sulfatadas-sódicas, como consecuencia de la incorporación de sales solubles durante el recorrido del flujo subterráneo. Este aumento en la concentración de iones en solución puede relacionarse específicamente con el aumento en el tiempo de contacto agua-sedimentos por ser áreas con bajas velocidades de circulación.

Es preciso aclarar que la ausencia de facies bicarbonatadas cálcicas, típicas de las áreas de recarga, pone de manifiesto la existencia de procesos de intercambio de calcio por sodio, por lo que la zona medanosa no corresponde a un sector de recarga directa. Lo mismo sucede en la zona de descarga, ya que en el campo de los aniones aún hay presencia de sulfatos, y no sólo de cloruros, por lo que se trata de una zona de descarga transitoria. En la Figura 25 se aprecia lo precedentemente explicado.

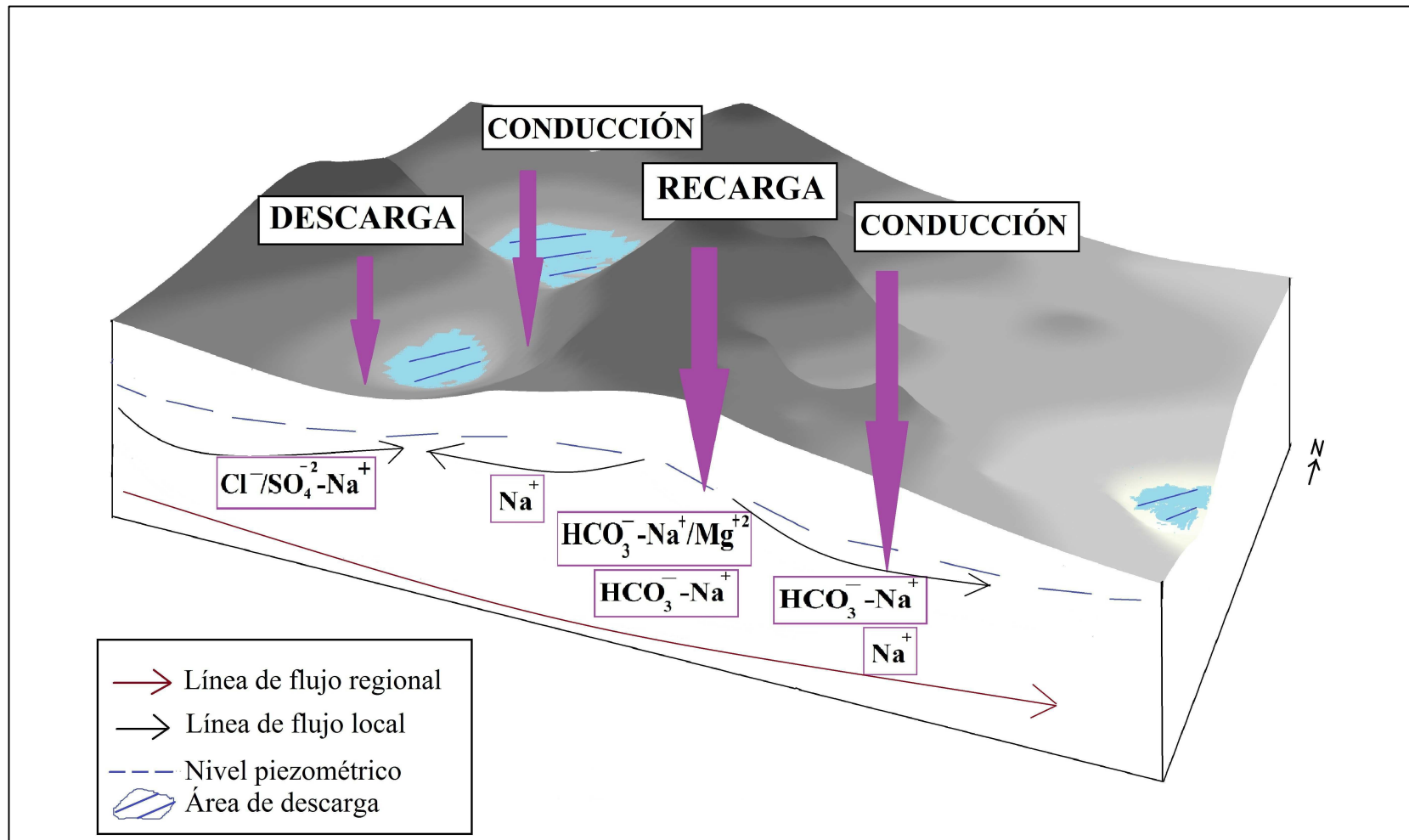


Figura 25: Relación entre las facies hidroquímicas y el flujo subterráneo. Croquis fuera de escala.

Capítulo 6: ISÓTOPOS AMBIENTALES

6.1. Marco teórico

La isotopía ambiental aplicada a la Hidrología permite el estudio de numerosos problemas relacionados con las aguas superficiales, con las aguas subterráneas y también con la hidrometeorología. Particularmente, los isótopos del hidrógeno y del oxígeno, como constituyentes de la molécula de agua, ofrecen un amplio rango de posibilidades para estudiar los procesos dentro del ciclo hidrológico.

El hidrógeno se presenta en la naturaleza bajo la forma de dos isótopos estables, el protio (^1H) y el deuterio (^2H o D), y un isótopo radioactivo, el tritio (^3H). El oxígeno posee tres isótopos estables: oxígeno-16 (^{16}O), oxígeno-17 (^{17}O) y oxígeno-18 (^{18}O). Todos estos son isótopos ambientales ya que se encuentran distribuidos ampliamente en el medio ambiente y participan de los ciclos naturales. La sustitución de isótopos, tanto de oxígeno como de hidrógeno en la molécula de agua, produce variaciones en aquellas propiedades directamente controladas por la masa molecular, como la densidad, la presión de vapor, etc., que dan lugar a un fraccionamiento isotópico durante los procesos físicos. En este sentido, los fenómenos meteorológicos responsables del transporte del agua en las distintas fases del ciclo hidrológico producen una caracterización isotópica del agua de acuerdo a su historia, lo cual es de gran utilidad en el estudio de su origen y de su comportamiento. Por ej., la concentración de sales por evaporación puede resolverse midiendo la composición isotópica, cuando los valores de deuterio y oxígeno-18 se alinean en una recta de evaporación (Dapeña, 2007).

Las técnicas que utilizan isótopos ambientales son una herramienta de gran utilidad en estudios hidrológicos e hidrogeológicos cuando se emplean conjuntamente con los procedimientos llamados "clásicos". Dado que estos isótopos identifican naturalmente a las aguas, sus principales ventajas sobre los trazadores artificiales son que permiten su uso en grandes áreas, aseguran el mismo comportamiento que las aguas bajo estudio al ser constituyentes naturales de las mismas y no contaminan el medio ambiente por ser parte de él.

Los resultados obtenidos con esta metodología se expresan en desviaciones por mil (δ ‰) definidas como:

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

δ : desviación isotópica en ‰.

M: muestra.

E: estándar internacional, Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW, Gonfiantini, 1978).

R: relación isotópica. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o $^2\text{H}/^1\text{H}$

La relación isotópica se define como el cociente entre el número de moléculas de la especie más pesada, menos abundante y el de la especie más ligera, más común. En el caso del oxígeno-18 (R_{18}) y deuterio (R_2) les corresponden las siguientes expresiones:

$$R_{18} = \frac{H_2^{18}O}{H_2^{16}O} \quad R_2 = \frac{H^2H^{16}O}{H_2^{16}O}$$

Por definición, el valor $\delta_{\text{V-SMOW}} = 0 \text{ ‰}$. Por lo tanto, un δ positivo indica una mayor concentración de los isótopos pesados ^{18}O o ^2H que el estándar (muestra enriquecida), mientras que un valor negativo de δ , significa que la muestra está empobrecida en el isótopo menos abundante respecto al estándar.

En base a los fundamentos expuestos precedentemente sobre la utilidad de estas técnicas, en el presente capítulo se desarrolla una caracterización isotópica del acuífero bajo estudio, partiendo para ello del conocimiento de la composición isotópica del agua de lluvia y subterránea. La importancia de este tipo de investigación radica en que es inédita en el acuífero de Quemú Quemú, por lo tanto los resultados obtenidos constituirán la base para trabajos futuros.

6.1.1. Composición isotópica del agua de lluvia

El conocimiento y la caracterización del contenido isotópico de las lluvias son de importancia fundamental cuando se inicia un estudio hidrológico dado que las mismas representan la función de entrada de la mayoría de los sistemas hidrológicos. Por este motivo, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) junto con la Organización Meteorológica Mundial (WMO), desarrollaron una red internacional de medición de isótopos en aguas de precipitación, denominada GNIP (Global Network for Isotopes in Precipitation) que comenzó a operar a principios de la década de 1960. Los objetivos principales de esta red son la evaluación, a escala global, de la distribución espacial y temporal de los contenidos de los isótopos en la precipitación y su dependencia con los parámetros meteorológicos (OIEA/WMO, 2002; Panarello *et al*, 1998). En este marco, el INGEIS creó una Red Nacional de Colectores (RNC) que integra la GNIP y que permite conocer las funciones de entrada

(contenido isotópico de la lluvia) en las distintas regiones del país (OIEA/WMO, 2002; Panarello *et al*, 1998; Dapeña y Panarello, 2002). Actualmente en la provincia de La Pampa y con motivo de varios proyectos de investigación se han instalado dos estaciones, integradas a la RNC, una en la localidad de Quemú Quemú y otra en Intendente Alvear, que registran la composición isotópica de las precipitaciones desde 2007.

Dansgaard (1964) realizó las primeras investigaciones con datos de la GNIP, sentó las bases para la aplicación de los métodos isotópicos en los estudios hidrogeológicos y explicó las variaciones isotópicas a través de los llamados “efectos” en términos de relaciones empíricas que involucran parámetros meteorológicos y geográficos. En este sentido, al depender el fraccionamiento isotópico de la temperatura (a menor temperatura, mayor fraccionamiento), conjuntamente con la condensación parcial generan los efectos de:

- "altitud": a medida que asciende la masa de aire las precipitaciones son más livianas, observándose una disminución en el contenido de oxígeno-18 (isótopo pesado);
- "continental": a medida que la masa de aire avanza tierra adentro, las lluvias son más ligeras;
- “latitud”: se relaciona directamente con la disminución de la temperatura y origina que las precipitaciones en altas latitudes (polos, climas fríos) estén más empobrecidas con respecto a las de bajas latitudes (en el Ecuador, climas cálidos); y
- “estacional”: relacionado también con las temperaturas, originando que las precipitaciones de invierno estén empobrecidas en el isótopo pesado con respecto a las de verano.

Desde que fueron publicados los primeros datos de la composición isotópica de aguas naturales (Friedman ,1953) pudo observarse una clara correlación entre los contenidos de deuterio y oxígeno-18. Esta relación para aguas meteóricas no afectadas por evaporación fue fijada por Craig (1961), cuando al volcar en un gráfico $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ la composición isotópica de las precipitaciones de todo el mundo, observó que los datos determinaban una banda lineal, que posteriormente fue conocida como **recta meteórica global** (Figura 26) y responde a la siguiente ecuación: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10\%$.

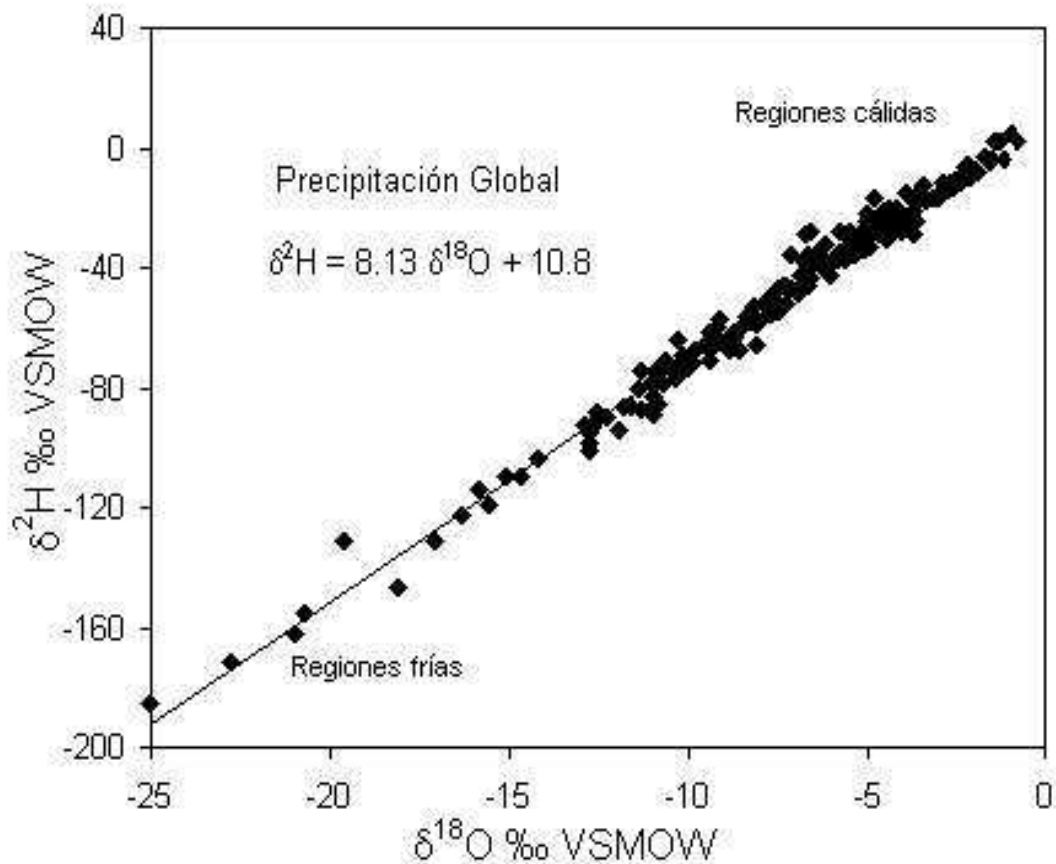


Figura 26: Recta meteórica global. Fuente: Craig, 1961.

Asimismo, en cualquier lugar la composición isotópica del hidrógeno y oxígeno en precipitaciones obedece a la relación lineal (Gonfiantini, 1999):

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

a = varía de 6,5 a 8.

d = varía de 0 a 30.

Esto permite definir rectas meteóricas locales. Según la posición que ocupen en la misma los resultados obtenidos a partir de la relación entre estos dos isótopos encontrada en las muestras de agua subterránea, es posible identificar procesos modificadores de la composición isotópica de la misma respecto a la lluvia que ocasiona la recarga (Escuder *et al*, 2009).

Dansgaard (1964) utilizó aquella correlación lineal para relacionar la composición isotópica de cualquier muestra de agua con la línea de aguas meteóricas y definió la ordenada al origen como exceso de deuterio (d). Este es un parámetro inherente al vapor original y es la

propiedad más útil para caracterizar el origen del mismo. En la mayoría de las precipitaciones continentales “d” es igual a 10‰ (Dapeña, 2007).

6.1.2. Composición isotópica del agua subterránea

Gat y Tzur (1967) demostraron que la composición isotópica del agua subterránea en climas templados refleja con buena aproximación la composición isotópica del promedio de la precipitación de una localidad, por lo que no habría un fraccionamiento significativo durante el proceso de recarga. Sin embargo, pueden ocurrir procesos que la modifiquen durante la misma, tales como la evaporación previa a la infiltración o variaciones estacionales de la precipitación evidenciadas por una infiltración selectiva.

6.2. Metodología

A fin de cumplir con el objetivo propuesto, se determinó el contenido de deuterio y oxígeno-18 en muestras de agua de lluvia y en muestras de agua subterránea. Respecto a las primeras, fueron colectadas en la “Estación Meteorológica Quemú Quemú”, por personal de COSYPRO, donde existen dos colectores integrados en la RNC. El lapso temporal del muestreo abarcó desde enero de 2007 a marzo de 2011, con un total de 24 datos, pero el registro no estuvo completo debido a la falta de precipitación o a la insuficiente cantidad de lluvia.

Las muestras de agua subterránea se extrajeron en mayo de 2011 junto con las muestras para análisis físico-químicos, pertenecientes a perforaciones particulares, por lo que se trata de la misma ubicación (Figura 14). Se incluyó también una muestra de agua superficial de la laguna Bárbulo. En todos los casos, cada muestra de agua se colocó en una botella de polipropileno de medio litro de capacidad, sin uso, previamente enjuagada con el agua a coleccionar. Este conjunto de muestras fue complementado con muestras de los pozos N° 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 de COSYPRO, que se tomaron en marzo de 2011, bajo los mismos criterios de extracción.

Las determinaciones isotópicas de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua (precipitación, superficial y subterránea), se practicaron en el laboratorio de Isótopos Estables del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS), cuyas técnicas se detallan en el ANEXO C.

6.3. Caracterización isotópica del acuífero de Quemú Quemú

6.3.1. Composición isotópica del agua de lluvia

La composición isotópica del agua de lluvia se evaluó a través de los resultados obtenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, que se exponen en la Tabla 9. La media para el $\delta^{18}\text{O}$ es de $-5,57\text{‰}$ y para el $\delta^2\text{H}$ es de $-32,85\text{‰}$, con un exceso de deuterio medio de $11,73\text{‰}$. El 67% de las muestras presentan un valor de este último parámetro mayor a 10‰ , lo cual señala su vinculación con lluvias originadas por vapor reciclado. Al graficar estos resultados en un diagrama convencional de $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ junto con la línea meteórica mundial (Figura 27), se observa que existe conexión entre los valores encontrados y esta línea.

Tabla 9: Análisis isotópicos de las lluvias de Quemú Quemú y resumen estadístico de los mismos.

fecha	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$	$\delta^2\text{H} \text{‰}$	$d \text{‰}$
	$\pm 0,3$	± 1	
ene-07	-7,34	-47,45	11,25
feb-07	-3,40	-17,95	9,24
ene-08	-2,79	-4,82	17,48
feb-08	-3,43	-16,04	11,39
mar-08	-10,54	-71,38	12,93
abr-08	-12,30	-84,16	14,22
may-08	-5,56	-30,66	13,79
jun-08	-5,18	-34,23	7,25
jul-08	-5,63	-33,30	11,75
ago-08	-6,46	-38,93	12,78
mar-09	-4,41	-26,15	9,10
abr-09	-4,26	-25,15	8,91
may-09	-3,90	-25,74	5,50
sep-09	-6,14	-38,38	10,77
oct-09	-4,71	-23,96	13,69
nov-09	-4,81	-29,77	8,70
dic-09	-3,72	-24,70	5,02
ene-10	-4,13	-26,37	6,67
mar-10	-7,74	-50,61	11,34
nov-10	-4,37	-19,52	15,43
dic-10	-4,46	-18,01	17,64
ene-11	-4,04	-18,79	13,56
feb-11	-4,23	-17,54	16,29
mar-11	-10,21	-64,75	16,94
media	-5,57	-32,85	11,73
mínimo	-12,30	-84,16	5,02
máximo	-2,79	-4,82	17,64

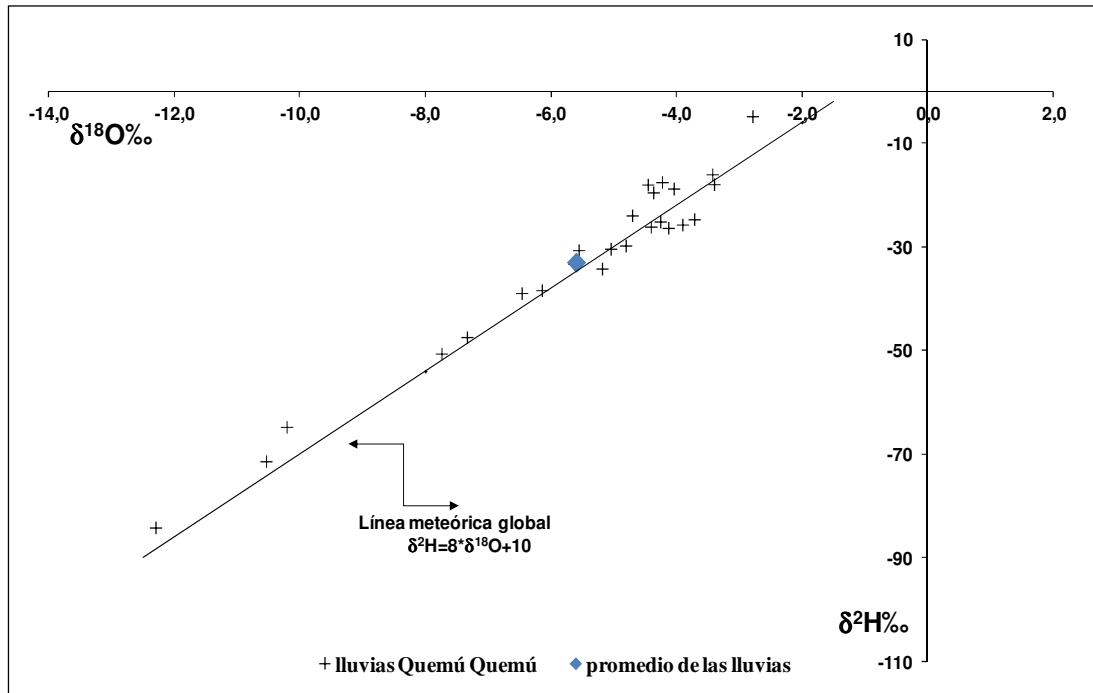


Figura 27: $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ de las lluvias de Quemú Quemú, promedio y recta meteórica global.

6.3.2. Composición isotópica del agua subterránea

Como se dijo anteriormente, la caracterización isotópica del agua subterránea se realizó en base a las muestras de las perforaciones particulares y de los pozos de COSYPRO. Los correspondientes resultados se exponen en las Tablas 10a y b.

Tabla 10: Análisis isotópicos de las muestras de aguas subterráneas y resumen estadísticos de los mismos. a) Muestras de perforaciones particulares. b) Muestras de los pozos de COSYPRO.

a)

<i>Muestra N°</i>	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$	$\delta^2\text{H} \text{‰}$	<i>d</i> ‰
	± 0.3	± 1	
1	-4,66	-27,80	9,45
2	-4,37	-25,13	9,84
3	-4,75	-26,68	11,30
4	-4,62	-25,21	11,78
5	-3,99	-22,64	9,27
6	-4,28	-24,66	9,54
7	-4,55	-26,22	10,21
8	-4,53	-25,10	11,11
9	-4,93	-27,73	11,72
10	-4,79	-25,94	12,42
11	-4,51	-27,47	8,63
12	-4,37	-28,65	6,31
14	-4,23	-23,78	10,09
15	-4,51	-25,02	11,04
16	-4,89	-26,45	12,71
17	-4,53	-24,10	12,10
18	-4,27	-24,63	9,57
19	-4,46	-28,02	7,65
20	-4,00	-26,91	5,11
21	-4,07	-25,21	7,35
22	-4,58	-26,20	10,44
23	-4,83	-27,36	11,25
24	-4,69	-26,09	11,44
25	-4,74	-26,37	11,55
26	-4,90	-25,39	13,81
media	-4,52	-25,95	10,23
máximo	-3,99	-22,64	13,81
mínimo	-4,93	-28,65	5,11

b)

<i>Pozo N°</i>	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$	$\delta^2\text{H} \text{‰}$	<i>d</i> ‰
	± 0.3	± 1	
4	-4,95	-27,74	11,86
6	-4,72	-27,51	10,28
7	-4,71	-28,12	9,57
9	-4,69	-27,66	9,88
10	-4,72	-27,39	10,37
11	-4,82	-27,44	11,13
12	-4,65	-27,10	10,13
13	-4,77	-27,28	10,90
14	-4,76	-27,52	10,54
media	-4,76	-27,53	10,52
máximo	-4,65	-27,10	11,86
mínimo	-4,95	-28,12	9,57

En estas tablas puede observarse que no existen notables diferencias entre los valores medios de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ entre ambos grupos de muestras. Sin embargo, entre las muestras de la Tabla 10 a), es importante la dispersión de los valores ya que varían entre -4,93 ‰ (muestra N° 9) y -3,99 ‰ (muestra N° 5) para el $\delta^{18}\text{O}$, y entre -28,65 ‰ (muestra N° 12) y -22,64 ‰ (muestra N° 5) para el $\delta^2\text{H}$, mientras que para los pozos de COSYPRO se aprecia poca dispersión en sus datos. Respecto a la muestra de agua superficial, los correspondientes valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ fueron de -1,37 ‰ y -11,23 ‰, respectivamente. Estos resultados se grafican en la Figura 28, junto con los ya mostrados en la Figura 27.

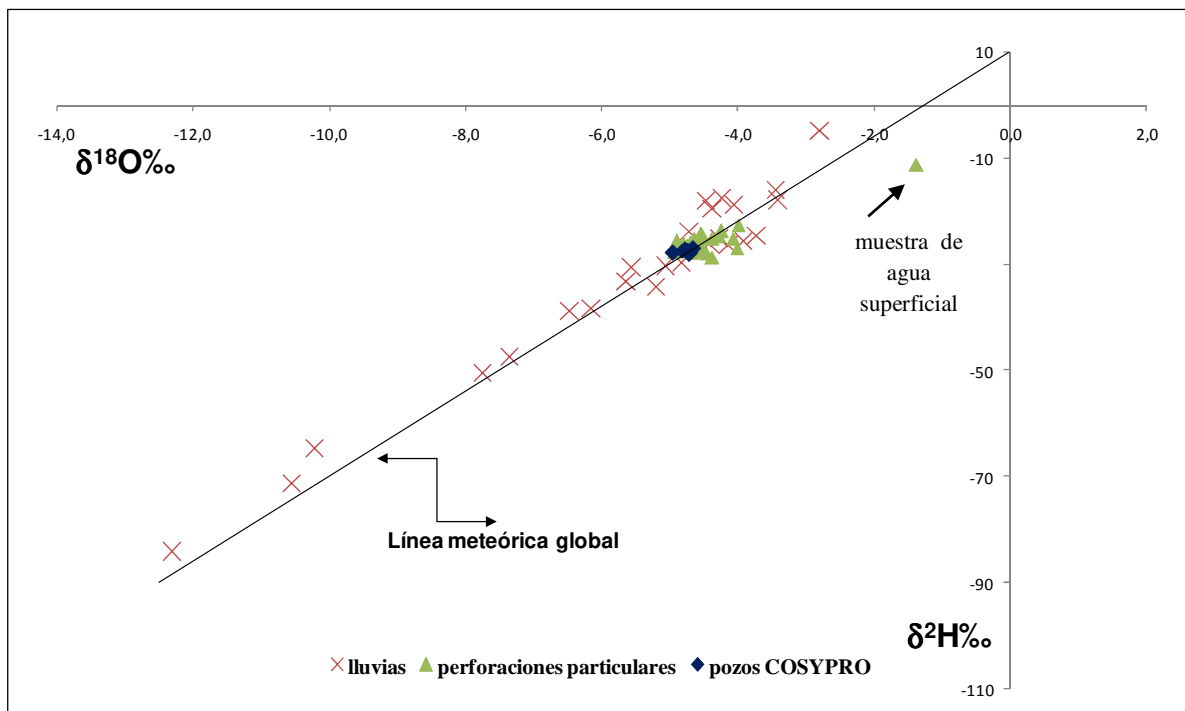


Figura 28: $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua subterránea, superficial y de las lluvias de Quemú Quemú, y recta meteórica global.

En esta Figura se aprecia que la ubicación de los resultados de las aguas subterráneas en general es consistente con la línea meteórica global. La muestra que se aleja del conjunto corresponde al cuerpo de agua superficial. Con motivo de apreciar la relación con la salinidad, en la Figura 29 se detallan todas las muestras diferenciadas por conductividad eléctrica (C. E.)², y las líneas de evaporación que siguen las muestras que no se ajustan a la línea meteórica global. Por el contrario, el promedio de muestras con menos de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se ajusta consistentemente a dicha recta. Luego, en la Figura 30 se muestra la relación C. E. vs. $\delta^{18}\text{O}$ a fin de identificar los posibles mecanismos de salinización según la posición que ocupan las muestras en el gráfico (Gonfiantini y Araguas, 1988). Así, en un grupo de muestras la salinidad está dada por la disolución de sales por tránsito dado que se registra un aumento de la C. E. sin cambios apreciables en su contenido isotópico. En cambio, las aguas sometidas a evaporación previa a la infiltración, siguen en general una tendencia diferente, con un aumento en los valores de C. E. acompañado de un enriquecimiento en isótopos pesados, que tiende a alcanzar un valor estacionario.

² Los datos de C. E. de COSYPRO no se detallan pero los mismos son inferiores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

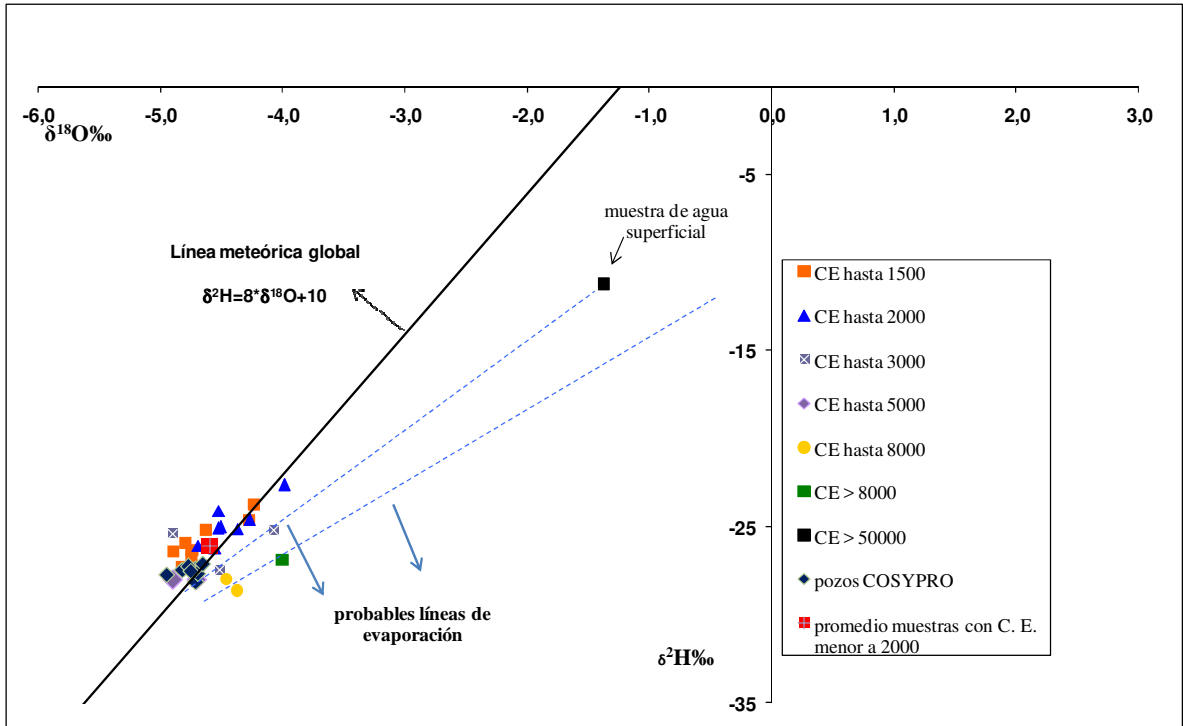


Figura 29: $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua subterránea y de la muestra superficial diferenciadas por C. E., promedio para las muestras con menos de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, recta meteórica global y probables líneas de evaporación. Los valores de C. E. se expresan en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

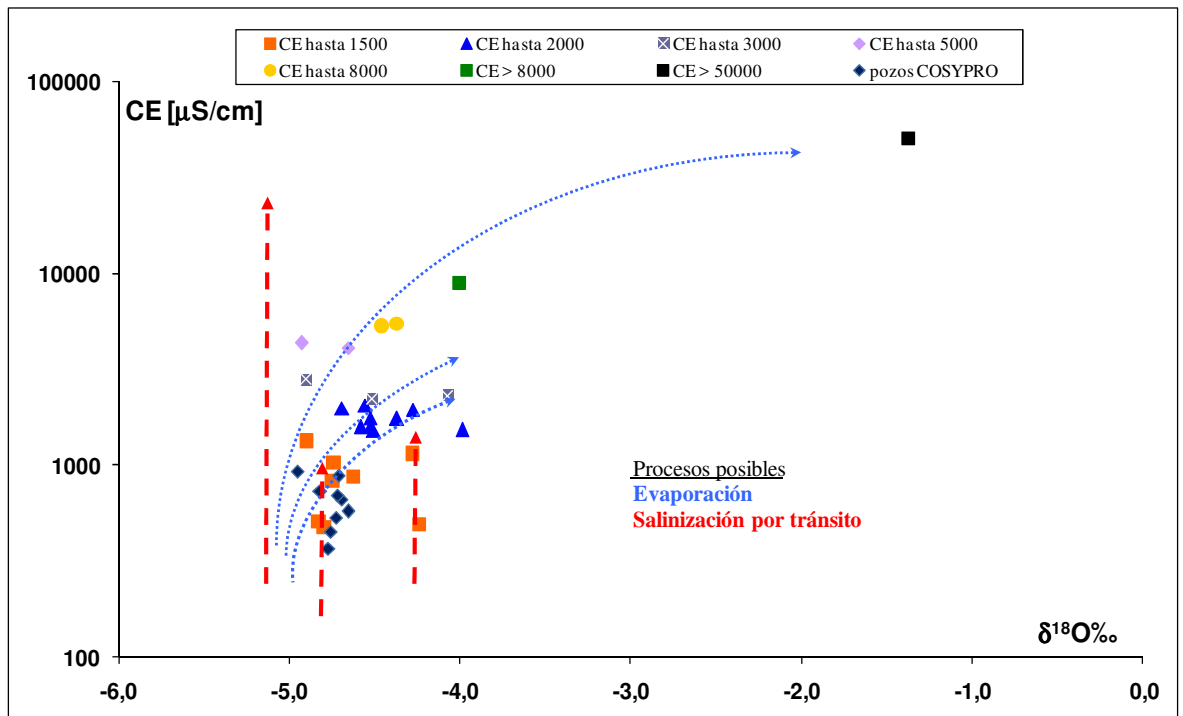


Figura 30: C. E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$) vs. $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua subterránea y superficial de Quemú Quemú, y probables procesos de salinización.

Estas figuras ponen de manifiesto claramente que la muestra de agua superficial tiene una composición isotópica más enriquecida respecto a las muestras de agua subterránea y un elevado contenido salino, lo cual es coherente dado que está ubicada en una zona de descarga, como se concluyó en el Capítulo 5. En las muestras con C. E. entre 2000 y 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y con más de 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ la principal causa de la salinidad estaría dada por la evaporación, mientras que en el resto prevalecería una disolución de sales por tránsito. A continuación (Figura 31), se muestra la ubicación de las muestras de agua subterránea y superficial en el área de estudio, distinguiendo los valores generales de C. E.

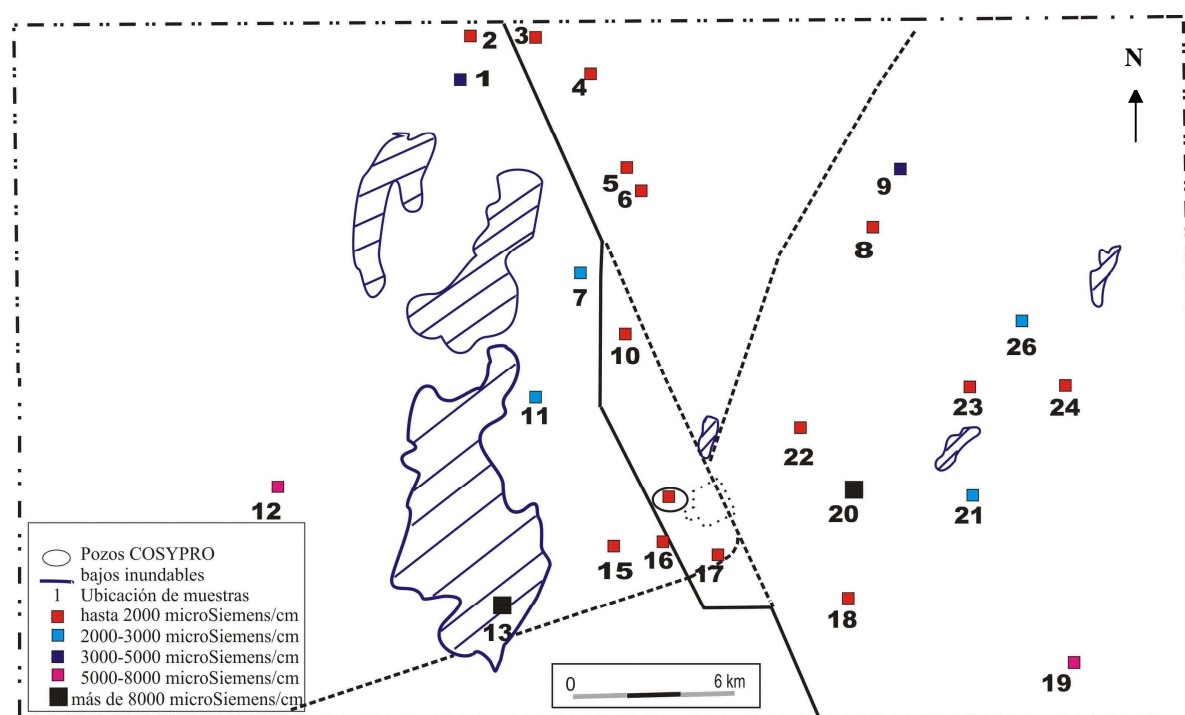


Figura 31: Mapa del área de estudio con ubicación de las muestras discriminadas por C. E.

6.4. Interpretación de los resultados

En base a las determinaciones isotópicas efectuadas, puede concluirse que existen dos grupos de muestras: en uno de ellos, la composición isotópica del agua subterránea es similar a la del agua de lluvia, mientras que en el segundo grupo se halló un enriquecimiento en las muestras de agua subterránea respecto a la composición encontrada en el agua de lluvia, principalmente en oxígeno-18. Específicamente en el primer grupo mencionado, el agua de lluvia infiltra y prácticamente no altera su composición isotópica original, comprobándose esto en las muestras de los pozos de COSYPRO, dado que tienen una composición isotópica

similar a la de las lluvias de la localidad (Figura 28). Lo mismo sucede con las muestras de las perforaciones particulares cuyos valores de C. E. son menores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y con las comprendidas entre 3000 y 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La ubicación espacial de los pozos de COSYPRO y de la mayoría de las muestras mencionadas para el primer rango de C. E., coincide con la línea vertical central que atraviesa el área de estudio (Figura 31), correspondiente a la zona de recarga del acuífero, como se estableció en el Capítulo 5. Las demás muestras, que tienen mayores valores de C. E.; se relacionan a las áreas de conducción. En ambos sectores, la salinidad de las muestras se atribuye a la disolución de sales por tránsito, según se muestra en la Figura 30.

El segundo grupo abarca muestras de agua subterránea y superficial con valores de C. E. entre 2000 y 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, así como también con más de 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En este caso, se trata de aguas que antes de infiltrar han sufrido evaporación, principal proceso de salinización, por lo que están enriquecidas isotópicamente respecto a las lluvias que las ocasionan (Figura 30). La ubicación espacial de estas muestras (Figura 31) coincide con las áreas de conducción y descarga que se establecieron en el Capítulo 5, ubicadas hacia el Este y Oeste de la línea vertical central mencionada en el párrafo anterior.

Capítulo 7: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Los acuíferos asociados a ambientes medanosos en la provincia de La Pampa son objeto de múltiples investigaciones tendientes a mejorar la comprensión de su funcionamiento. En este trabajo específicamente se caracterizó, desde un punto de vista hidrogeoquímico e isotópico, la composición de las aguas subterráneas en los alrededores de Quemú Quemú. La integración de estas metodologías permitió cumplir satisfactoriamente con los objetivos planteados.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, se distinguieron las siguientes facies químicas: bicarbonatada-sódica/magnésica, bicarbonatada-sódica, sódica sin anión dominante y clorurada/sulfatada-sódica. Las dos primeras fueron encontradas en muestras localizadas en cercanías del cordón medanoso que atraviesa al área de estudio de Norte a Sur y en los pozos de COSYPRO, por lo que se trata de una zona de recarga. Las facies bicarbonatada-sódicas también fueron encontradas hacia los laterales del cordón medanoso junto con facies sódicas sin anión dominante, y las mismas se asociaron a zonas de conducción del flujo subterráneo. La restante facies responde a la máxima evolución química en aniones y cationes encontrada, evidenciando la presencia de áreas de descarga. Particularmente en las áreas de conducción y de descarga se trata de muestras situadas en los bajos topográficos donde, a partir de los mapas de isovalores de conductividad eléctrica y de isocontenido de cloruros, se comprobó que existe un incremento de la salinidad desde los médanos hacia estas depresiones.

Respecto al análisis temporal, se observó que el sodio fue el catión dominante en los tres años analizados, y puntualmente para el año 2009 se estableció la relación directa que existe entre el sodio y los aniones principales, mientras que entre los fluoruros y la dureza se encontró una tendencia hacia una relación inversa. Además se determinó, para el año 2009, que conforme aumenta la concentración de fluoruros, lo hacen las correspondientes a arsénico, vanadio, boro y selenio. El origen de estos últimos, según la bibliografía, se vincula a la litología del material acuífero, principalmente a la presencia de vidrio volcánico.

En lo referente a la calidad del agua para consumo humano, en coincidencia con la bibliografía, los fluoruros resultaron ser los elementos que más limitan la aptitud de las aguas para este uso, tanto en los pozos de COSYPRO como en las muestras de perforaciones particulares. En estas últimas, también se registraron excesos de arsénico, sulfatos y bicarbonatos. De la integración de todas las muestras y de los parámetros resultó que los

sectores del acuífero con mejor aptitud para consumo humano están vinculados a las zonas de recarga y de conducción, en tanto que hacia las zonas de descarga desmejora la calidad para consumo humano. En cuanto a la calidad del agua para consumo ganadero, en general está entre las categorías buena y aceptable, mientras que para riego no es recomendable. Esto no es un obstáculo productivo en el área de estudio ya que la mayoría son establecimientos ganaderos o de agricultura de secano.

Finalmente, los resultados isotópicos sostienen lo concluido en el análisis hidrogeoquímico. En este sentido, se observó que la composición isotópica del agua subterránea en la zona de los médanos es similar a la encontrada en el agua de lluvia, lo cual indica la rápida infiltración de ésta, confirmando que se trata de una zona de recarga. Además, pudo determinarse que las muestras de agua subterránea ubicadas en las depresiones tienen un enriquecimiento isotópico respecto a las lluvias, revelando la existencia de un proceso de evaporación previo a la infiltración. Esto se manifiesta en la mayor conductividad eléctrica de estas muestras, como se detalla en el mapa de isovalores respectivo.

Lo planteado hasta el momento demuestra la importancia de abordar desde una perspectiva multidisciplinaria el estudio de sistemas complejos, como son los acuíferos, a fin de conseguir resultados consistentes. Si bien esta tesina no abarcó en detalle toda el área de estudio, se destaca que constituye en la zona la primera aplicación de las metodologías antes descriptas, generando así las bases para investigaciones futuras. En este sentido algunas recomendaciones son:

- Continuar con las mediciones de isótopos en agua de lluvia, y caracterizar físico-químicamente a las mismas.
- Ampliar el muestreo de aguas subterráneas, y hacerlo extensivo a los bajos inundables localizados en los alrededores de Quemú Quemú.
- Realizar, al menos trimestralmente, análisis físico-químicos completos de los pozos de COSYPRO.

Bibliografía

Administración Provincial del Agua. 2010. Disponible en: <http://www.apa.lapampa.gov.ar/Lluvias/Default.htm>. Consultada el 17 de Agosto de 2010.

Anuario Estadístico de la provincia de La Pampa 2010. Dirección General de Estadísticas y Censos.

Arigós, E., 1970. Informe técnico hidrogeológico de la provincia de La Pampa. Comité de Investigación de Aguas Subterráneas, La Plata, 70 p. (inédito).

Arroyo, C., 2005. Estimación de la recarga en el sector de explotación del acuífero que abastece a la localidad de Quemú Quemú, Provincia de La Pampa. Tesina de grado. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNLPam, 51 p.

Auge, M., 2009. Arsénico en el agua subterránea. Disponible en: www.femeba.org.ar/archivos/Arsénico%20en%20Agua%20I.doc. Consultada el 19 de Septiembre de 2011.

Bavera, G. A., E. E. Rodríguez, H. A. Beguet, O. A. Bocco y J. C. Sanchez, 1979. Aguas y Aguadas. Ed. Hemisferio Sur, 284 p, Buenos Aires.

Bellini Saibene, Y., G. Casagrande, J. Caviglia, R. Colazo, H. Lorda, Z. Roberto y A. Sipowicz, 2000. Evaluación de pérdidas económicas por efecto de las inundaciones, en el norte de la provincia de La Pampa. EEA INTA Anguil “Ing.Agr.Guillermo Covas”.

Bonorino, A. G., F. Limbozzi, R. Albouy y C. Lexow, 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.

Cabrera, A., M. Blarasin, S. Cabrera, E. Matteoda, M. L. Gómez, G. Villalba, F. Hildmann y A. Bettera. 2005. Arsénico y Flúor en el acuífero freático en el Sur de Córdoba: línea de base hidroquímica y problemática ambiental vinculada. II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de Hidrología Subterránea- IV Congreso Hidrogeológico Argentino. Río Cuarto. Argentina. 182 p.

Calmels, A. P., 1996. Bosquejo Geomorfológico de La Provincia de La Pampa. UNLPam. Santa Rosa. 106 p.

Calmels, A. P. y S. A. Casadío, 2005. Compilación geológica de la provincia de La Pampa. 1° Edición. 96-101. Amerindia Nexo di Nápoli. Santa Rosa, La Pampa.

Cano, E., G. Casagrande, H. A. Conti, B. Fernandez, R. Hevia, J. C. Lea Plaza, D. Maldonado Pinedo, H. Martinez, M. A. Montes, C. O. Scoppa y C. A. Peña Zubiate, 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. Clima, Geomorfoloía, Suelo y Vegetación. INTA-Gobierno de La Pampa-UNLPam. Santa Rosa. 493 p.

Carreño, L. y E.F. Viglizzo, 2007. Provisión de Servicios Ecológicos y Gestión de los Ambientes Rurales en Argentina. Área Estratégica de Gestión Ambiental. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.

Chebli, G. A., M. E. Mozetic, E. A. Rossello y M. Bühler, 1999. Cuencas sedimentarias de la llanura Chacopampeana. En Caminos R. (Ed.): Geología Argentina, 50-52. Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires.

Código Alimentario Argentino. 1971. Ley 18284 Decreto Reglamentario 2126/71. Anexo 1. Capítulo XII, Art 982/1079. Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificada., art. 982. Modificado por resolución conjunta SPRyRS y SAGPyA 68/2007 y 196/2007.

Cooperativa de Obras, Servicios Públicos, Crédito y Provisión de Quemú Quemú Limitada, COSYPRO Ltda. 2010. Disponible en: www.cosypro.com. Consultada el 22 de julio de 2010.

Craig, H., 1961. Isotope variations in meteoric waters. *Science*, 133: 1702-1703.

Custodio, E., 1976a. Aspectos geomorfológicos y geodinámicos en relación con las aguas subterráneas y el balance hídrico. En E. Custodio y M.R. Llamas (Eds.): Hidrología Subterránea. Tomo II: 2267-2288. Ed. Omega, Barcelona.

Custodio, E., 1976b. Hidrogeoquímica. En E. Custodio y M.R. Llamas (Eds.): Hidrología Subterránea. Tomo I: 1008-1018. Ed. Omega, Barcelona.

Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 436-468.

Dapeña C., C.J. Schulz, H.O. Panarello, P. Dornes, y G. Dalmaso, 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., 2007. Isótopos Ambientales livianos: su aplicación en hidrología e hidrogeología. Tesis Doctoral. Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias y Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. 442p

Dapeña, C. y H. O. Panarello, 2002. Red Nacional de Colectores de Isótopos en Precipitación en Argentina: su importancia en estudios hidrogeológicos. XXXII IAH & VI ALHSUD "Groundwater and Human development" Congress, Volume (CD): 1053-1061.

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. y J. O. Tulio, 1998. Estructuras del subsuelo y su influencia en la morfología en el norte de la provincia de La Pampa. X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica, Actas III: 227-330, Buenos Aires.

Dirección General de Estadísticas y Censos. 2010. Disponible en: http://www.estadisticalapampa.gov.ar/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=19&Itemid=30. Consultada el 17 de Agosto de 2010.

Escuder R., J. Fraile, S. Jordana, F. Ribera, X. Sánchez-Vila y E. Vázquez-Suñé (Eds.). 2009. Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona, España.

Folguera, A. y M. Zárate, 2009. La sedimentación neógena continental en el sector extrandino de argentina central. Revista de la Asociación Geológica Argentina 64 (4): 692-712.

Friedman, I., 1953. Deuterium content of natural water and other substances. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 4: 89-103. Symp. Vienna, 1966) IAEA, Vienna, p. 49-60.

Gat, J. R. y Y. Tzur, 1967. Modification of the isotopic composition of rainwater by processes which occur before groundwater recharge. *Isotopes in Hydrology* (Proc. Symp. Vienna, 1966) IAEA, Vienna, p. 49-60.

Giai, S. B., 1975. Plan de investigación de aguas subterráneas. Dirección de Aguas Subterráneas, 40 p, Santa Rosa (inédito).

Giai, S. B., 1987. Morfología de la superficie freática de la provincia de La Pampa. III Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales. Serie suplemento 3: 73-82. Santa Rosa.

Giai, S. B. y R. O. Gatto Cáceres, 1996. Ajuste de un modelo para registros freatimétricos mensuales en General Pico-La Pampa. IV Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, Actas 2: 221-227, La Plata.

Giai, S. B. y J. O. Tullio, 1998. Características de los principales acuíferos de la provincia de La Pampa. Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Revista 12: 51-68.

Goin, F., C. I. Montalvo y G. Visconti, 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. Londres, Inglaterra.

Gonfiantini, R. y L. A. Araguas, 1988. Los isótopos ambientales en el estudio de la intrusión salina. *Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros*. Granada, España.

Gonfiantini, R., 1999. Investigating the hydrological Cycle with Environmental Isotopes. Conference. II South American Symposium on Isotope Geology. Córdoba, Argentina, September 1999. Actas 537-547.

Iribarra, M.A., 2006. Caracterización geoambiental en el área de Quemú Quemú con énfasis en los recursos hídricos. Tesina de grado. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNLPam, 59 p.

Jensen, R., M. Marazzi, J. Savioli, J. Brea y H. Tavecchio, 2000. Diagnóstico de inundación en la región noreste de la Provincia de La Pampa, Argentina. Gobierno de la Provincia de La Pampa.

Ley 1027/80 y Decreto Reglamentario N° 193/81. Estableciendo el régimen de interés público provincial para asegurar la conservación y uso racional de las fuentes de agua potable. Ministerio de Obras Públicas, APA. Dirección General de SAPASA.

Linares, E., E. J. Llambías y C. O. Latorre, 1980. Geología de la provincia de la Pampa, República Argentina y geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas. Asociación 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.

Llamas, M. R. y A. Galofré, 1976. Concepto de hidrogeología. En E. Custodio y M.R. Llamas (Eds.): Hidrología Subterránea, Tomo I: 249-258. Ed. Omega, Barcelona.

Malán, J. M. y C. J. Schulz, 1986. Informe sobre cuatro pozos de explotación en Quemú Quemú. Administración Provincial del Agua, Santa Rosa, (inédito).

Malán, J. M. y C. J. Schulz, 1988. Estudio hidrogeológico para la provisión de agua potable a Quemú-Quemú, La Pampa. Segundas Jornadas Geológicas Bonaerenses Actas: 567-578, Bahía Blanca.

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.

Montico, S., 2004. El manejo del agua en el sector rural de la región argentina. Disponible en: www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/16/1AM16.htm .Consultada el 20 de Octubre de 2011.

OIEA/WMO, 2002. Global Network for Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. <http://isohis.iaea.org>

ONU/WWAP (Naciones Unidas/Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos). 2003. 1er Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo: Agua para todos, agua para la vida. París, Nueva York y Oxford. UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) y Berghahn Books.

Organización Mundial de la Salud. Guías para la calidad del agua potable. Ginebra. 2006. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowsres.pdf. Consultada el 8 de Julio de 2011.

Panarello, H. O., L. Araguas-Araguas, J. Gerardo Abaya y E. Gibert, 1998. The role of the "Global Network for Isotopes in precipitation, GNIP, in hydrological and hydroclimatic studies. Key note. International Symposium on Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere. International Atomic Energy Agency, Vienna: 79-91.

Peña Zubiate, C. A., M. D. Pinedo, H. Martínez y R. Hevia, 1980. Carta de suelos. En Cano, E., G. Casagrande, H. A. Conti, B. Fernandez, R. Hevia, J. C. Lea Plaza, D. Maldonado Pinedo, H. Martinez, M. A. Montes, C. O. Scoppa y C. A. Peña Zubiate (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.

Ramos, V. A., 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. En Caminos R. (Ed.): Geología Argentina, 50-52. Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires.

Rodríguez, M. N. N., P. F. Dornes, C. J. Schulz y M. G. Castro, 2011. Simulación numérica preliminar del flujo de agua subterránea en un sector aledaño a Quemú Quemú, La Pampa. VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Captación y modelación de agua subterránea. Salta. Argentina. 210 p.

Russo, A., R. Ferello y G. Chebli, 1979. Llanura Chaco Pampeana. En Turner, J. C. (Coord): Segundo Simposio de Geología Regional Argentina I: 139-183. Academia Nacional de Ciencias. Córdoba

Salazar Lea Plaza, J. C., 1980. Carta geomorfológica. En Cano, E., G. Casagrande, H. A. Conti, B. Fernandez, R. Hevia, J. C. Lea Plaza, D. Maldonado Pinedo, H. Martinez, M. A. Montes, C. O. Scoppa y C. A. Peña Zubiate (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., 1966a. La cuenca de Macachín, provincia de La Pampa. Nota preliminar. Dirección Nacional de Geología y Minería, informe inédito. 13 p. carpeta N°617. Buenos Aires.

Salso, J., 1966b. Apreciación preliminar acerca de las perforaciones Macachín N°1 y Abramo N°2 (provincia de La Pampa). Instituto Nacional de geología y Minería, informe inédito. 8 p. Buenos Aires

Salso, J., 1966c. La cuenca de Macachín, provincia de La Pampa. Asociación Geológica Argentina, Revista, XXI(2): 107-117. Buenos Aires.

Schulz, C. J., 1997. Plan de optimización del servicio de agua potable. Primera Parte: Evaluación del Recurso. Informe interno COSYPRO. Quemú Quemú, (Inédito).

Schulz, C.J., 1999. Apuntes de Hidrología Ambiental. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa. Primera Edición.

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 en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. 322 p.

Servicio Meteorológico Nacional, 2011. Disponible en: <http://www.smn.gov.ar/?mod=clima&id=29>. Consultada el 28 de Julio de 2011.

Stappenbeck, R., 1926. Geologie und grundwasserkunde der Pampa. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 512 p, Stuttgart.

Thorntwaite, C. W. y J. R. Mather, 1955. The water balance. Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology, VIII(1):104 p, New Jersey.

U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. U.S Department of Agriculture, Handbook 60, 160 p.

Viglizzo, E. F., E. G. Jobbágy, L. Carreño, F. C. Frank, R. Aragón, L. De Oro, and V. Salvador, 2009. The dynamics of cultivation and floods in arable lands of central argentina. Hydrol. Earth Syst. Sci. (13): 491–502.

Zambrano, J. J., 1974. Cuencas sedimentarias en el subsuelo de la provincia de Buenos Aires y zonas adyacentes. Asociación Geológica Argentina, Revista, XXIX (4): 443-469.

Anexo A: Datos climáticos

Tabla A.1.: Promedios pluviométricos mensuales (en mm) por década (1921-2010). Fuente: <http://www.apa.lapampa.gov.ar>.

Década	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1921-1930	68,9	79,9	72,9	43,1	25,6	20,7	24,5	25,6	32,5	67,8	76,3	87,4
1931-1940	70	67,6	80,6	33,7	36	13,7	14	17,6	46,6	78,1	67,7	84,9
1941-1950	45,8	82	98,5	48,7	35,5	21,6	20,9	16,9	23	75,3	71,3	68,6
1951-1960	79,8	79,2	104	59,2	25,7	33,6	22,9	17	42,3	81,3	64	56,6
1961-1970	64,3	56,8	116,6	45,8	24,4	17,6	7,3	26,8	49,4	96	109,7	101
1971-1980	119,9	122,3	128,1	82,2	49,1	35,8	26,3	33,6	59,3	115,8	113,2	119
1981-1990	128,7	121,7	161,46	77,9	39,7	13,5	41,3	30,2	61,2	117,6	141,4	110,3
1991-2000	105,9	100,9	114,75	90	58,1	16,9	11,5	40,65	52,75	101,4	84,9	138,5
2001-2010	71,4	103,9	143,7	35,8	12,8	11,3	17,4	21	56,05	88,3	94,9	83,5
media mensual	83,86	90,48	113,40	57,38	34,10	20,52	20,68	25,48	47,01	91,29	91,49	94,42

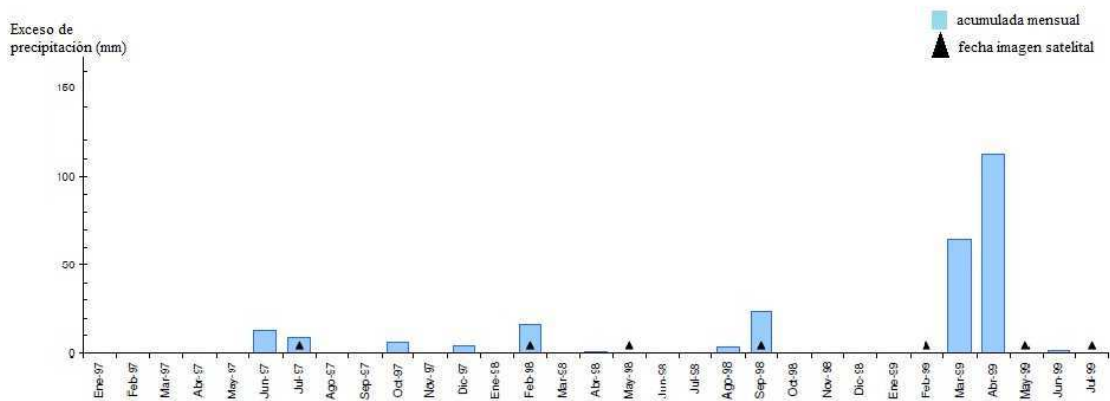


Figura A.1.: Exceso de precipitación mensual (abril 1997- julio 1999). Jensen *et al*, 2000.

Tabla A.2.: Detalle de precipitaciones por mes y por año. Fuente: <http://www.apa.lapampa.gov.ar> y <http://www.policia.lapampa.gov.ar>

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total año
1921	82,0	145,0	110,0	9,0	5,0	3,0	25,0	0,0	82,0	192,0	53,0	155,0	861,0
1922	30,0	74,0	9,0	35,0	65,0	85,0	5,0	0,0	22,0	53,0	105,0	36,0	519,0
1923	66,0	81,0	120,0	6,0	9,0	76,0	24,0	133,0	24,0	94,0	52,0	136,0	821,0
1924	39,0	31,0	55,0	90,0	13,0	8,0	13,0	0,0	10,0	26,0	10,0	73,0	368,0
1925	96,0	161,0	59,0	13,0	49,0	0,0	69,0	1,0	63,0	40,0	138,0	121,0	810,0
1926	46,0	103,0	145,0	101,0	10,0	6,0	35,0	44,0	0,0	23,0	100,0	63,0	676,0
1927	204,0	23,0	50,0	6,0	0,0	6,0	38,0	51,0	0,0	89,0	158,0	43,0	668,0
1928	25,0	49,2	111,0	75,0	37,0	15,0	36,0	8,0	72,0	61,0	67,0	53,0	609,2
1929	75,0	65,0	54,0	76,0	14,0	8,0	0,0	0,0	28,0	67,0	43,0	0,0	430,0
1930	26,0	67,0	16,0	20,0	54,0	0,0	0,0	19,0	24,0	33,0	37,0	194,0	490,0
media	68,9	79,9	72,9	43,1	25,6	20,7	24,5	25,6	32,5	67,8	76,3	87,4	625,2
1931	242,0	10,0	87,0	38,0	0,0	0,0	36,0	31,0	2,0	35,0	51,0	20,0	552,0
1932	0,0	86,0	161,0	8,0	34,0	0,0	2,0	31,0	35,0	120,0	22,0	94,0	593,0
1933	105,0	59,0	108,0	26,0	47,0	0,0	6,0	0,0	70,0	56,0	12,0	32,0	521,0
1934	80,0	5,0	112,0	0,0	2,0	3,0	10,0	20,0	51,0	130,0	128,0	115,0	656,0
1935	55,0	76,0	14,0	5,0	3,0	12,0	10,0	21,0	9,0	89,0	88,0	200,0	582,0
1936	20,0	143,0	6,0	68,0	4,0	14,0	33,0	0,0	81,0	55,0	76,0	79,0	579,0
1937	7,0	47,0	94,0	1,0	53,0	1,0	0,0	2,0	18,0	29,0	100,0	119,0	471,0
1938	57,0	41,0	139,0	153,0	32,0	2,0	9,0	16,0	4,0	26,0	73,0	0,0	552,0
1939	41,0	49,0	17,0	13,0	127,0	27,0	9,0	4,0	161,0	189,0	55,0	21,0	713,0
1940	93,0	160,0	68,0	25,0	58,0	78,0	25,0	51,0	35,0	52,0	72,0	169,0	886,0
media	70,0	67,6	80,6	33,7	36,0	13,7	14,0	17,6	46,6	78,1	67,7	84,9	610,5
1941	86,0	127,0	175,0	31,0	21,0	14,0	60,0	33,0	0,0	18,0	72,0	60,0	697,0
1942	6,0	132,0	52,0	9,0	15,0	0,0	2,0	4,0	12,0	49,0	166,0	68,0	515,0
1943	0,0	15,0	92,0	30,0	3,0	59,0	75,0	3,0	9,0	290,0	144,0	16,0	736,0
1944	150,0	64,0	67,0	75,0	30,0	2,0	0,0	10,0	15,0	107,0	37,0	41,0	598,0
1945	51,0	163,0	96,0	64,0	0,0	5,0	3,0	48,0	23,0	64,0	47,0	33,0	597,0
1946	55,0	49,0	124,0	145,0	127,0	108,0	11,0	21,0	39,0	49,0	60,0	193,0	981,0
1947	9,0	89,5	118,0	47,0	8,0	23,5	0,0	0,0	34,0	15,0	68,5	30,5	443,0
1948	73,7	11,0	83,0	15,0	85,0	0,0	11,8	21,0	49,3	42,0	9,2	86,0	487,0
1949	19,0	140,0	97,0	49,0	14,0	4,0	28,0	24,0	17,0	38,0	22,0	71,0	523,0
1950	8,0	30,0	81,0	21,5	52,0	0,0	18,0	5,5	32,0	81,0	88,0	87,0	504,0
media	45,8	82,1	98,5	48,7	35,5	21,6	20,9	17,0	23,0	75,3	71,4	68,6	608,1

Tabla A.2.: (continuación)

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total año
1951	86,0	108,0	13,0	8,0	66,0	13,0	9,0	0,0	19,0	23,0	63,0	88,0	496,0
1952	56,0	22,0	112,0	0,0	21,0	94,0	13,0	33,0	61,0	182,0	60,0	27,0	681,0
1953	41,0	70,0	84,0	50,0	5,0	6,0	2,0	10,0	33,0	120,0	75,0	88,0	584,0
1954	12,0	24,0	54,0	163,0	6,0	19,0	14,0	8,0	24,0	90,0	41,0	19,0	474,0
1955	85,0	319,0	38,0	67,0	23,0	19,0	67,0	9,0	5,0	53,0	122,0	62,0	869,0
1956	156,0	40,0	296,0	109,0	23,0	6,0	27,0	57,0	55,0	57,0	111,0	12,0	949,0
1957	47,0	11,0	232,0	72,0	66,0	89,0	0,0	0,0	36,0	52,0	42,0	139,0	786,0
1958	64,0	10,0	40,0	67,0	8,0	16,0	72,0	5,0	75,0	21,0	33,0	51,0	462,0
1959	118,0	105,0	90,0	55,0	25,0	45,0	1,0	45,0	5,0	122,0	72,0	49,0	732,0
1960	133,0	83,0	81,0	1,0	14,0	29,0	24,0	3,0	110,0	93,0	21,0	31,0	623,0
media	79,8	79,2	104,0	59,2	25,7	33,6	22,9	17,0	42,3	81,3	64,0	56,6	665,6
1961	96,0	187,0	25,0	21,0	43,0	12,0	5,0	41,0	13,0	125,0	1,0	27,0	596,0
1962	24,0	38,0	9,0	22,0	12,0	0,0	0,0	72,0	72,0	23,0	132,0	108,0	512,0
1963	22,0	36,0	166,0	20,0	3,0	19,0	6,0	46,0	71,0	174,0	80,0	197,0	840,0
1964	36,0	76,0	210,0	111,0	31,0	0,0	6,0	0,0	60,0	65,0	98,0	110,0	803,0
1965	134,0	71,0	18,0	48,0	5,0	49,0	0,0	5,0	0,0	66,0	183,0	81,0	660,0
1966	52,0	20,0	152,0	113,0	38,0	10,0	39,0	0,0	0,0	20,0	197,0	72,0	713,0
1967	14,0	52,0	48,0	24,0	57,0	5,0	9,0	9,0	46,0	259,0	58,0	66,0	647,0
1968	69,0	31,0	203,0	0,0	0,0	18,0	8,0	95,0	85,0	67,0	73,0	169,0	818,0
1969	30,0	32,0	246,0	84,0	50,0	56,0	0,0	0,0	50,0	21,0	212,0	122,0	903,0
1970	166,0	25,0	89,0	15,0	5,0	7,0	0,0	0,0	97,0	140,0	63,0	58,0	665,0
media	64,3	56,8	116,6	45,8	24,4	17,6	7,3	26,8	49,4	96,0	109,7	101,0	715,7
1971	59,0	29,0	57,0	56,0	46,0	8,0	10,0	44,0	81,0	112,0	30,0	40,0	572,0
1972	20,0	40,0	97,0	116,0	19,0	27,0	0,0	31,0	190,0	44,0	160,0	187,0	931,0
1973	136,0	128,0	136,0	146,0	4,0	140,0	37,0	8,0	23,0	168,0	27,0	118,0	1071,0
1974	210,0	164,0	108,0	0,0	107,0	53,0	15,0	20,0	12,0	79,0	55,0	101,0	924,0
1975	244,0	97,0	269,0	116,0	55,0	24,0	0,0	7,0	120,0	55,0	96,0	0,0	1083,0
1976	178,0	187,0	111,0	105,0	10,0	8,0	40,0	130,0	4,0	67,0	202,0	243,0	1285,0
1977	95,0	189,0	188,0	23,0	15,0	39,0	2,0	22,0	8,0	368,0	96,0	137,0	1182,0
1978	82,0	163,0	113,0	48,0	18,0	4,0	65,0	21,0	78,0	26,0	107,0	186,0	911,0
1979	167,0	87,0	147,0	29,0	55,0	42,0	62,0	53,0	62,0	89,0	122,0	119,0	1034,0
1980	8,0	139,0	55,0	183,0	162,0	13,0	32,0	0,0	15,0	150,0	237,0	59,0	1053,0
media	119,9	122,3	128,1	82,2	49,1	35,8	26,3	33,6	59,3	115,8	113,2	119,0	1004,6

Tabla A.2.: (continuación)

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total año
1981	107,0	81,0	75,0	77,0	49,0	25,0	7,0	5,0	35,0	106,0	226,0	173,0	966,0
1982	112,0	144,0	152,0	224,0	16,0	27,0	16,0	0,0	56,0	170,0	135,0	96,0	1148,0
1983	137,0	82,0	157,0	107,0	117,0	0,0	5,0	102,0	4,0	207,0	43,0	231,0	1192,0
1984	220,0	206,0	175,0	32,0	23,0	25,0	8,0	35,0	103,0	51,0	158,0	107,0	1143,0
1985	136,0	48,0	109,0	64,0	10,0	0,0	275,0	0,0	119,0	155,0	136,0	160,0	1212,0
1986	342,0	135,0	105,0	166,0	10,0	3,0	0,0	68,0	73,0	77,0	130,0	48,0	1157,0
1987	159,0	324,0	358,0	35,0	4,0	2,0	49,0	67,0	34,0	58,0	156,0	32,0	1278,0
1988	29,0	56,0	144,0	29,0	12,0	15,0	0,0	15,0	87,0	10,0	95,0	30,0	522,0
1989	9,0	33,0	271,6	0,0	25,0	38,0	41,0	10,0	19,0	26,0	50,0	112,0	634,6
1990	36,0	108,0	68,0	45,0	131,0	0,0	12,0	0,0	67,0	166,0	48,0	55,0	736,0
media	128,7	121,7	161,5	77,9	39,7	13,5	41,3	30,2	59,7	102,6	117,7	104,4	998,9
1991	114,0	25,0	30,0	34,0	34,0	35,0	3,0	58,0	130,0	50,0	51,0	283,0	847,0
1992	101,0	117,0	172,0	35,0	115,0	5,0	9,0	153,5	97,0	17,0	92,0	279,0	1192,5
1993	134,0	45,0	38,0	105,0	97,0	19,0	0,0	10,0	71,0	53,0	148,0	38,0	758,0
1994	65,0	30,0	87,0	17,0	49,0	32,0	28,0	55,0	6,5	76,0	4,0	145,0	594,5
1995	159,0	33,0	98,0	158,0	63,0	12,0	0,0	15,0	18,0	87,0	100,0	33,0	776,0
1996	82,0	193,0	146,5	105,0	37,0	4,0	6,0	12,0	44,0	74,0	123,0	183,0	1009,5
1997	83,0	32,0	116,0	132,0	14,0	24,0	20,0	14,0	7,0	271,0	55,0	241,0	1009,0
1998	95,0	233,0	28,0	118,0	26,0	0,0	18,0	60,0	120,0	83,0	55,0	27,0	863,0
1999	95,0	128,0	279,0	118,0	0,0	26,0	16,0	12,0	20,0	63,0	167,0	156,0	1080,0
2000	131,0	173,0	153,0	78,0	146,0	12,0	15,0	17,0	14,0	240,0	54,0	0,0	1033,0
media	105,9	100,9	114,8	90,0	58,1	16,9	11,5	40,7	52,8	101,4	84,9	138,5	916,3
2001	113,0	237,0	190,0	78,0	3,0	16,0	5,0	34,0	190,0	189,0	170,0	28,0	1253,0
2002	120,0	19,0	264,0	75,0	45,0	2,0	4,0	87,0	52,0	81,0	108,0	70,0	927,0
2003	48,0	90,0	78,0	40,0	2,0	9,0	2,0	19,0	8,5	23,0	130,0	128,0	577,5
2004	76,0	41,0	70,0	66,0	27,0	0,0	90,0	17,0	0,0	142,0	184,0	149,0	862,0
2005	42,0	105,0	126,0	0,0	15,0	28,0	12,0	37,0	22,0	42,0	52,0	55,0	536,0
2006	34,0	127,0	218,0	27,0	0,0	0,0	12,0	0,0	0,0	72,0	64,0	87,0	641,0
2007	17,0	103,0	235,0	20,0	6,0	19,0	0,0	5,0	105,0	75,0	67,0	31,0	683,0
2008	176,0	150,0	33,0	18,0	0,0	34,0	20,0	11,0	60,0	125,0	66,0	103,0	796,0
2009	25,0	57,0	173,0	4,0	25,0	0,0	22,0	0,0	58,0	25,0	99,0	145,0	633,0
2010	63,0	110,0	50,0	30,0	5,0	5,0	7,0	0,0	65,0	109,0	9,0	39,0	492,0
Prom	71,4	103,9	143,7	35,8	12,8	11,3	17,4	21,0	56,05	88,3	94,9	83,5	740,1

Anexo B: Aspectos hidroquímicos

Tabla B.1.: Comparación entre normativas internacionales (OMS), nacionales (CAA) y provinciales (Ley N° 1027, Decreto N° 193).

Sustancia	OMS	CAA	Ley Provincial N° 1207
Aluminio (mg/L)	0,2	0,2	
Antimonio (mg/L)	0,02	0,02	
Arsénico (mg/L)	0,01	0,01	0,15-0,18
Bario (mg/L)	0,7		
Berilio (mg/L)	No es probable su presencia en agua de consumo.		
Boro (mg/L)	0,5	0,5	
Cadmio (mg/L)	0,003	0,005	
Cinc (mg/L)	No es peligroso para la salud en las concentraciones presentes normalmente en el agua de bebida	5	
Cloruros (mg/L)	No es peligroso para la salud en las concentraciones presentes en el agua de bebida	350	700
Cobre (mg/L)	2	1	
Cromo (mg/L)	0,05		
Fluoruros (mg/L)	1,5	0,8-1,3	1,2-1,8
Hierro (mg/L)	No es peligroso para la salud en las concentraciones presentes normalmente en el agua de bebida	0,3	0,1
Manganeso (mg/L)	0,4	0,1	
Mercurio (mg/L)	0,001	0,001	
Molibdeno (mg/L)	0,07		
Níquel (mg/L)	0,02	0,02	
Nitratos (mg/L)	50	45	45
Nitritos		0,1	0,1
Plata (MG/L)	Los datos disponibles son inadecuados para poder determinar un valor de referencia basado en criterios de salud	0,05	
Plomo (mg/L)	0,01	0,05	
Selenio (mg/L)	0,01	0,01	
Sodio (mg/L)	No es peligroso para la salud en las concentraciones presentes en el agua de bebida		
Sulfatos (mg/L)	No es peligroso para la salud en las concentraciones presentes en el agua de bebida	400	300
SDT (mg/L)	No es peligroso para la salud en las concentraciones presentes en el agua de bebida	1500	
Bicarbonatos (como CaCO ₃) (mg/L)			30-400
Dureza total (mg/L)	Los niveles en el agua de consumo no son peligrosos para la salud	400	200
PH	No es peligroso para la salud en los valores presentes en el agua de bebida	6,5-8,5	

Tabla B.2.: Valores de los análisis físico-químicos completos de los pozos N° 4, 6, 7 y 10 de COSYPRO, para los años 1995, 1996 y 2009.

Pozo y fecha	R. S.	C. E.	pH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	A. T.	D. T.	Ca ⁺²	Mg ⁺²	F ⁻	As	Na ⁺	K ⁺
	mg/L	mmho/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
28/11/1995 P4	596,00	739,00	8,50	20,00	35,00	28,00	320,00	348,00	112,00	21,00	14,00	2,50	0,20	161,00	7,80
26/03/1996 P4	548,00	632	8,50	28,00	72,00	44,00	324,00	368,00	112	19,00	16,00	2,40	0,20	138,00	3,90
23/02/2009 P4	675,00	927,00	8,20	20,00	27,00	6,00	375,00	381,00	69,00	13,00	8,80	3,20	0,18	175,00	5,60
28/11/1995 P6	342,00	373,00	8,20	20,00	25,00	0,00	168,00	168,00	160,00	30,00	21,00	0,90	< 0,04	69,00	19,50
26/03/1996 P6	287	318	8,20	8,00	71,00	0,00	188,00	188,00	132	26,00	16,00	0,92	< 0,04	46,00	11,70
23/02/2009 P6	420,00	530,00	7,70	9,00	11,00	0,00	243,00	243,00	121,00	27,00	13,00	1,00	0,03	76,00	5,20
28/11/1995 P7	492,00	547,00	8,20	24,00	33,00	0,00	272,00	272,00	176,00	30,00	24,00	1,40	0,05	92,00	11,70
26/03/1996 P7	438	496	8,20	16,00	88,00	0,00	304,00	304,00	160	26,00	23,00	1,40	< 0,04	69,00	11,70
23/02/2009 P7	650,00	878,00	7,70	23,00	29,00	2,00	351,00	353,00	135,00	26,00	17,00	1,70	0,06	145,00	6,20
28/11/1995 P10	358,00	411,00	8,20	12,00	72,00	0,00	192,00	192,00	120,00	18,00	18,00	1,40	< 0,04	69,00	11,70
26/03/1996 P10	330	382	8,20	12,00	80,00	0,00	224,00	224,00	92	16,00	13,00	1,60	< 0,04	69,00	11,70
23/02/2009 P10	450,00	695,00	7,90	16,00	29,00	2,00	289,00	291,00	109,00	19,00	15,00	1,60	0,05	117,00	7,00

Tabla B.3.: Datos del análisis efectuado en los pozos de COSYPRO por el SEGEMAR en el año 2009.

Analito	Pozo 4	Pozo 6	Pozo 7	Pozo 8	Pozo 9	Pozo 10	Pozo 11	Pozo 12	Pozo 13
Manganeso (mg/L)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,00
Arsénico (µg/L)	177,00	26,00	55,00	127,00	37,00	48,00	127,00	21,00	18,00
Cadmio (µg/L)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cinc (µg/L)	13,00	27,00	34,00	21,00	10,00	< 2	35,00	< 2	8,00
Cobre (µg/L)	< 2	6,00	16,00	2,00	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Hierro (µg/L)	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	18,00
Aluminio (µg/L)	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	40,00
Antimonio (µg/L)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Berilio (µg/L)	4,00	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Boro (µg/L)	1445,00	320,00	872,00	1249,00	540,00	591,00	729,00	363,00	122,00
Talio (µg/L)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Vanadio (µg/L)	663,00	63,00	184,00	289,00	123,00	149,00	335,00	76,00	83,00
Cobalto (µg/L)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Plata (µg/L)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Selenio (µg/L)	24,00	< 10	20,00	21,00	16,00	13,00	13,00	11,00	< 10
Mercurio (µg/L)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Estroncio (µg/L)	182,00	346,00	363,00	258,00	369,00	387,00	309,00	478,00	236,00
Cromo (µg/L)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Níquel (µg/L)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	3,00	< 2	< 2
Molibdeno (µg/L)	< 10	< 10	10,00	17,00	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Plomo (µg/L)	< 5	6,00	< 5	< 5	< 5	< 5	7,00	7,00	9,00
Bario (µg/L)	16,00	25,00	31,00	19,00	19,00	20,00	20,00	24,00	16,00
Litio (mg/L)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Sodio (mg/L)	175,00	76,00	145,00	232,00	100,00	117,00	117,00	86,00	20,00
Potasio (mg/L)	5,60	5,20	6,20	4,60	5,40	7,00	4,30	4,80	8,40
Calcio (mg/L)	13,00	27,00	26,00	11,00	24,00	19,00	20,00	24,00	30,00
Magnesio (mg/L)	8,80	13,00	17,00	13,00	17,00	15,00	29,00	15,00	16,00
Cloruros (mg/L)	20,00	9,00	23,00	60,00	9,90	16,00	9,60	7,10	10,00
Sulfatos (mg/L)	27,00	11,00	29,00	64,00	13,00	29,00	13,00	9,30	10,00
Nitratos + Nitritos (mg/L)	2,10	2,50	3,30	2,70	3,10	4,40	2,90	5,40	14,00
Fluoruros (mg/L)	3,20	< 1	1,70	2,70	1,40	1,60	2,20	1,50	1,50
Fósforo Total (mg/L)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Silicio Total (como SiO ₂) (mg/L)	60,00	61,00	59,00	59,00	61,00	59,00	61,00	63,00	61,00
SST (mg/L)	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
SDT (mg/L)	675,00	420,00	650,00	775,00	530,00	450,00	570,00	440,00	270,00
Alcalinidad total (como CaCO ₃) (mg/L)	381,00	243,00	353,00	406,00	313,00	291,00	364,00	263,00	108,00
Bicarbonatos (como CaCO ₃) (mg/L)	375,00	242,00	351,00	401,00	311,00	289,00	361,00	262,00	108,00
Dureza total (mg/L)	69,00	121,00	135,00	81,00	130,00	109,00	169,00	122,00	141,00
PH	8,20	7,70	7,70	8,20	7,80	7,90	7,90	7,70	7,60
Conductividad (mS/cm) (25°C)	927,00	530,00	878,00	1155,00	658,00	695,00	727,00	572,00	367,00

Tabla B.4.: Clasificación de las muestras según el residuo seco, los tipos químicos y la relación con los sectores de recarga, conducción y descarga del acuífero.

Residuo seco (mg/L)	Muestras N°	Tipos químicos	Sector del acuífero relacionado
< 1000	5, 16 y 22	bicarbonatada- sódica/magnésica y bicarbonatada-sódica	recarga
1000-2000	11 y 21	sódica y bicarbonatada-sódica	conducción incipiente
2000-3000	1 y 9	sódica	conducción
> 3000	12	clorurada/sulfatada-sódica	descarga

Tabla B.5.: Coeficientes de correlación para los pozos de COSYPRO.

	S.D.T.	C. E.	pH	D.T.	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺²	Ca ⁺²	F ⁻	As
S. D. T	1												
CE	0,973851	1											
pH	0,782078	0,830091	1										
D.T.	-0,479538	-0,575876	-0,714464	1									
Cl⁻	0,734464	0,835943	0,673227	-0,578294	1								
SO₄⁻²	0,754675	0,873118	0,724704	-0,626807	0,976822	1							
HCO₃⁻	0,946651	0,900938	0,756008	-0,364559	0,551339	0,610107	1						
Na⁺	0,961501	0,993549	0,865218	-0,628741	0,830027	0,871921	0,903132	1					
K⁺	-0,590172	-0,476642	-0,417844	0,075916	-0,229843	-0,188197	-0,698911	-0,515517	1				
Mg⁺²	-0,093736	-0,179571	-0,266644	0,858658	-0,291312	-0,312690	0,059582	-0,222444	-0,224415	1			
Ca⁺²	-0,780598	-0,842144	-0,983105	0,693592	-0,688821	-0,750008	-0,776772	-0,882161	0,461494	0,226361	1		
F⁻	0,714306	0,728534	0,894901	-0,638538	0,547904	0,556270	0,631436	0,745364	-0,398337	-0,301581	-0,843890	1	
As	0,761297	0,747484	0,889206	-0,456455	0,483724	0,513929	0,742882	0,753930	-0,421278	-0,017750	-0,844210	0,963097	1

Tabla B.6.: Coeficientes de correlación para las perforaciones particulares.

	Residuo seco	CE	pH	Dureza total	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺²	Ca ⁺²	F ⁻
Residuo seco	1												
CE	0,999560	1											
pH	0,226873	0,212096	1										
Dureza total	-0,444126	-0,430997	-0,912148	1									
Cl⁻	0,966380	0,967636	0,061315	-0,295962	1								
SO₄⁻²	0,959411	0,962417	0,047284	-0,295962	0,978167	1							
CO₃⁻²	0,543112	0,537532	0,676927	-0,792071	0,332266	0,306096	1						
HCO₃⁻	0,632399	0,625540	0,750705	-0,840611	0,432562	0,426940	0,950848	1					
Na⁺	0,994324	0,993092	0,314599	-0,517713	0,950911	0,941246	0,583476	0,685751	1				
K⁺	-0,462891	-0,460694	-0,686698	0,681434	-0,453891	-0,437706	-0,295002	-0,477477	-0,539129	1			
Mg⁺²	-0,229288	-0,221836	-0,866110	0,944147	-0,075075	0,000161	-0,756518	-0,757521	-0,307901	0,613017	1		
Ca⁺²	-0,572414	-0,556003	-0,880184	0,969321	-0,439478	-0,377948	-0,761085	-0,841709	-0,636867	0,683007	0,834187	1	
F⁻	0,601601	0,603282	0,653675	-0,752159	0,414865	0,435875	0,865028	0,858267	0,636096	-0,487936	-0,742900	-0,704881	1

Tabla B.7.: Clasificación de las aguas para bebida de bovinos. Fuente: Bavera *et al*, 1979.

Para		Sales totales	Cloruro de sodio	Sulfatos	Magnesio
Cría	Inverne-Tambo				
deficiente	deficiente	< 1000
muy buena	muy buena	> 1000	600	500	200
muy buena	buena	< 2000	1200	1000	250
buena	aceptable	< 4000	2400	1500	300
aceptable	mala	< 7000	4200	2500	400
mala	...	< 11000	6600	4000	500
condicionada	...	< 13000	10000	7000	600

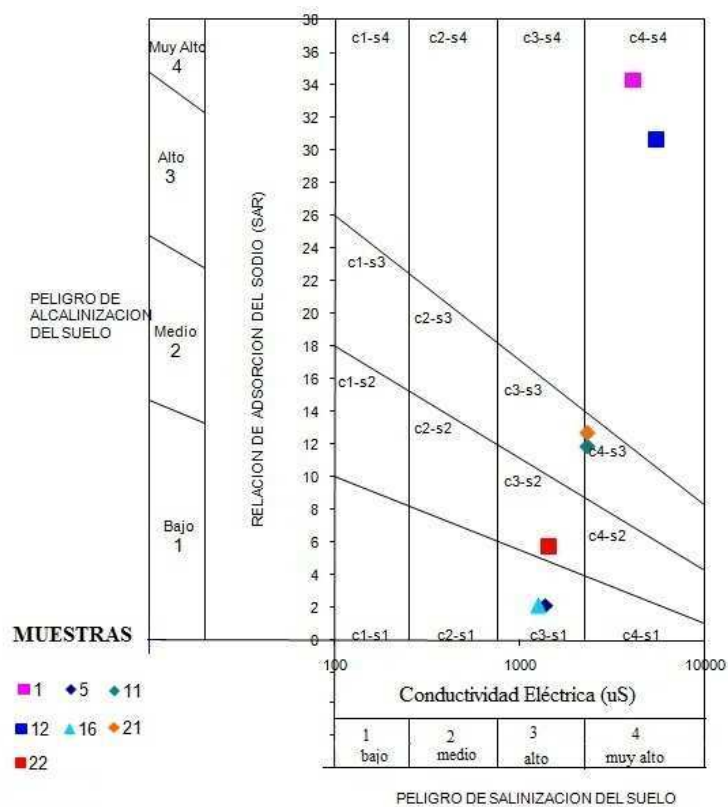


Figura B.1.: Clasificación de las aguas para riego de las ocho muestras de perforaciones particulares (la muestra N° 9 no es visible en el gráfico ya que se encuentra fuera del límite del mismo al tener un valor de SAR de 38,5).

Anexo C: Técnicas de laboratorio

1) TÉCNICAS EMPLEADAS POR EL LABORATORIO DE AGUAS DE LA ADMINISTRACIÓN PROVINCIAL DEL AGUA PARA DETERMINACIONES FÍSICO-QUÍMICAS COMPLETAS

Conductividad Eléctrica	Método conductimétrico. Se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución para conducir la corriente eléctrica. Esta corriente generada es medida empleando una célula con electrodos y un conductivímetro. A mayor concentración de sales, mayor será el registro medido en esa muestra de agua.
pH	Método Electrométrico. Se basa en la medición del potencial eléctrico generado entre dos electrodos, uno de referencia y otro de medida. El pH metro mide el grado de alcalinidad o basicidad de una muestra de agua.
Alcalinidad	Método titulométrico. La muestra es titulada con Acido Sulfúrico, utilizando como indicador fenolftaleína hasta pH 8,3, como consecuencia del cambio de color del indicador indica el total de hidróxidos y una mitad del carbonato presente. La Alcalinidad Total es determinada por titulación hasta un pH de 3,7-5,1, e incluye carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, y se utiliza como indicador verde de bromocresol. Precisión del método: cantidad mínima detectable: 10 mg/l.
Dureza	Método titulométrico de complejación con ácido etilendiaminotetracético (EDTA). El EDTA y sus sales de sodio forman un complejo de quelato soluble al añadirse a las soluciones de algunos cationes metálicos. Si a una solución acuosa que contenga iones calcio y magnesio a un pH de 10 +/- 0.1, se añade una pequeña cantidad de indicador, como negro de eriocromo T o calmagita, la solución toma un color rojo vino. Al añadir el EDTA como reactivo de titulación, los iones calcio y magnesio forman un complejo, y, cuando todos estos iones estén incluidos en dicho complejo, la solución cambiará del rojo vino al azul, señalando el punto final de la titulación. Precisión del Método: cantidad mínima detectable: 10 mg/l.
Cloruros	Método Titulométrico de precipitación, (Argentométrico). La muestra es titulada con solución de Nitrato de Plata y como indicador se utiliza Cromato de Potasio. El titulante reacciona con los iones Cloruros presentes para producir un precipitado de Cloruro de Plata insoluble. Antes que hayan precipitado, los iones plata con el exceso de cromato forman un precipitado de Cromato de Plata marrón rojizo, lo cual indica el punto final de la titulación. Precisión del Método: cantidad mínima detectable: 1 mg/l.
Sulfatos	Método gravimétrico. Los iones sulfatos presentes en la muestra reaccionan con iones Bario en medio ácido, para formar un precipitado blanco de Cloruro de Bario. El precipitado se recoge en un papel de filtro, y es calcinado a 800 °C durante una hora en crisol de porcelana. Precisión del método: cantidad mínima detectable: < 1 mg/l.
Fluoruros	Método Espectrofotométrico. El método colorimétrico SPNDS se basa en la reacción entre fluoruros y una laca coloreada de zirconio. El fluoruro reacciona con la laca coloreada, disociando una parte de ella para dar un anión complejo incoloro (ZrF6-2) y el colorante. Al aumentar el contenido de fluoruros, el color producido se hace cada vez más pálido. Precisión del Método: cantidad mínima detectable: 20 µg/l.
Arsénico	Método espectrofotométrico (SDDC): El Arsénico inorgánico se reduce a Arsina, utilizando solución ácida de Cinc en un generador Gutzeit. Se hace pasar el compuesto reducido a través de un frasco lavador que contiene solución de Acetato de Plomo, a un tubo de absorción que contiene Dietiltiocarbamato de Plata disuelto en Cloroformo. En el tubo de absorción, el arsénico reacciona con la sal de plata, formando un complejo rojo soluble, el cual es medido por fotometría. Precisión del método: cantidad mínima detectable: 1 µg/l.
Calcio	Método titulométrico de complejación con EDTA. Cuando se añade EDTA al agua que contiene iones de Calcio y Magnesio, aquel se combina primero con el calcio. El calcio se determina directamente con EDTA cuando el pH es lo suficientemente alto para que precipite el magnesio como hidróxido, utilizando un indicador que se combine con el calcio únicamente. Precisión del método: cantidad mínima detectable: 10 mg/l.
Magnesio	Método de cálculo. El magnesio se calcula como diferencia entre la dureza y el calcio, como CaCO3. Precisión del método: cantidad mínima detectable: 10 mg/l.
Potasio	Método Fotométrico. Consiste en el análisis de la luz obtenida al quemar un determinado gas que lleva una proporción conocida del líquido a analizar, en un fotómetro de llama.
Sodio	Método Fotométrico.

2) TÉCNICAS EMPLEADAS POR EL INSTITUTO DE TECNOLOGÍA MINERA DEL SEGEMAR

a) *Determinación de metales/metaloides en columna líquida.*

La metodología empleada para cada uno de los analitos es la que se indica a continuación:

Aluminio – Se emplea la norma EPA 200.7 (determinación de metales por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP)), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 10 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de emisión atómica marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Antimonio – Se emplea la norma EPA 206.5 (digestión de la muestra previo a la determinación) y la norma SW-846 Método 7062 (determinación de antimonio por generación de hidruros), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 2 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotérmico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Arsénico – Se emplea la norma EPA 206.5 (digestión de la muestra previo a la determinación) y la norma EPA 206.3 (determinación de arsénico por generación de hidruros), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 2 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotérmico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Bario – Se emplea la norma EPA 200.7 (determinación de metales por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP)), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 1 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de emisión atómica marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000.

Berilio – Se emplea la norma EPA 200.7 (determinación de metales por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP)), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 0,5 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de emisión atómica marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Boro – Se emplea la norma EPA 200.7 (determinación de metales por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP)), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 0,1 mg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de emisión atómica marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Cadmio – Se emplea la norma EPA 213.2 (determinación de cadmio por atomización electrotérmica), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 0,5 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotérmico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Cinc – Se emplea la norma SW-846 Method 7951 (determinación de cinc por atomización electrotrémica), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 1 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotrémico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Cobalto – Se emplea la norma SW-846 Method 7201 (determinación de cobalto por atomización electrotrémica), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 1 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotrémico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Cobre – Se emplea la norma SW-846 Method 7211 (determinación de cobre por atomización electrotrémica), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 1 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotrémico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Cromo – Se emplea la norma EPA 200.7 (determinación de metales por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP)), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 1 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de emisión atómica marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Hierro – Se emplea la norma EPA 200.7 (determinación de metales por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP)), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 5 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de emisión atómica marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Manganeso – Se emplea la norma EPA 200.7 (determinación de metales por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP)), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 1 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de emisión atómica marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Litio – Se emplea la norma SW 846 Método 7430 (determinación de litio por espectrometría de absorción atómica por llama), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 0,05 mg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotrémico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Mercurio – Se emplea la norma EPA 245.1 (determinación de mercurio por la técnica de vapor frío), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 0,05 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica

marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotérmico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Molibdeno – Se emplea la norma SW-846 Method 7481 (determinación de molibdeno por atomización electrotérmica), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 1 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotérmico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Níquel - Se emplea la norma SW-846 Method 7521 (determinación de níquel por atomización electrotérmica), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 1 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotérmico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Plomo – Se emplea la norma SW-846 Method 7421 (determinación de plomo por atomización electrotérmica), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 1 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotérmico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Selenio – Se emplea la norma EPA 206.5 (digestión de la muestra previo a la determinación) y la norma EPA 270.3 (determinación de selenio por generación de hidruros), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 2 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotérmico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Silicio – Se emplea la norma EPA 200.7 (determinación de metales por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP)), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 0,1 mg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de emisión atómica marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Plata – Se emplea la norma SW-846 Method 7761 (determinación de plata por atomización electrotérmica), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 0,2 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotérmico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Estroncio – Se emplea la norma EPA 200.7 (determinación de metales por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP)), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 0,01 mg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de emisión atómica marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Talio – Se emplea la norma SW-846 Method 7841 (determinación de talio por atomización electrotrémica), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 1 µg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de absorción atómica marca Shimadzu, modelo 6701, equipado con atomizador de llama, atomizador electrotrémico y generador de hidruros. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

Vanadio – Se emplea la norma EPA 200.7 (determinación de metales por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP)), aplicable al caso de aguas superficiales y subterráneas. El límite de detección del método es de 0,01 mg/L. El instrumental a utilizar es un espectrómetro de emisión atómica marca Perkin Elmer, modelo Optima 3000. La validación de la metodología se lleva a cabo con muestras de referencia certificadas del NIST y Analytical Products Group de Estados Unidos.

b) *Determinación de aniones*

La metodología empleada para cada uno de los analitos es la que se indica a continuación:

Fluoruros, cloruros, sulfatos, nitratos, nitritos – Se emplea la técnica de cromatografía iónica. La validación de la metodología se lleva a cabo con un estudio de la recuperación del analito con sucesivos “spikes”. El límite de detección para el fluoruro es de 0,5 mg/L.

Fósforo total – Se emplea la técnica de espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP). El límite de detección es de 0,05 mg/L.

c) *Otras determinaciones*

La metodología empleada para cada uno de los analitos es la que se indica a continuación:

pH –Se emplea la técnica del Standard Methods.

Conductividad –Se emplea la técnica conductimétrica del Standard Methods.

Alcalinidad total –Se emplea la técnica potenciométrica del Standard Methods (con titulador automático).

Dureza total –Se efectúa por cálculo.

Sólidos disueltos totales y sólidos en suspensión totales –Se emplea la técnica gravimétrica del Standard Methods.

Calcio, potasio, magnesio y sodio – Se emplea la técnica de espectrometría de absorción atómica por llama.

3) TÉCNICAS EMPLEADAS POR EL INGEIS PARA DETERMINACIONES ISOTÓPICAS

Se utilizaron dos técnicas 1) espectrometría de masas de relaciones isotópicas (IRMS) y 2) espectroscopia láser (OA-ICOS: Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy).

- **IRMS:** para la medición de ^2H , las muestras se tratan siguiendo la técnica enunciada por Coleman *et al.* (1982) con las modificaciones sugeridas en Florkowoski y Rogovic (1983), Hayes y Johnson (1988) y Schimmelman y De Niro (1993). Esta técnica consiste en la reducción de agua a hidrógeno al hacer reaccionar 5 miligramos del agua a analizar con zinc metálico a $485 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 35 minutos. De esta forma se obtiene hidrógeno gaseoso, apto para ser medido en el espectrómetro (INGEIS, 2005).

En la medición de ^{18}O se utiliza la técnica descrita en Panarello y Parica (1984) que incluye referencias a las metodologías desarrolladas por Epstein y Mayeda (1953) y Roether (1970) y está adaptada a las posibilidades del INGEIS. En líneas generales, este método se basa en la transferencia del oxígeno-18 contenido en la muestra de agua a analizar, al dióxido de carbono de un tubo, en condiciones de equilibrio a temperatura constante (25°C). Posteriormente el gas se somete a una purificación criogénica, se colecta mediante nitrógeno líquido y transfiere al espectrómetro de masas (Panarello y Parica, 1984).

Las mediciones de las relaciones isotópicas se realizan en un espectrómetro de masas Finnigan MAT Delta S de colector múltiple y sistema de introducción automático.

- **ESPECTROSCOPIA LASER:** se utiliza un equipo Los Gatos Research inc. (OA-ICOS: Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy) para la medición simultánea de ^2H y ^{18}O (Lis *et. al.*, 2008).

INCERTIDUMBRE: La gran cantidad de variables aleatorias involucradas en estos métodos hace muy dificultoso realizar una propagación de errores convencional. Por lo tanto, la incertidumbre corresponderá a la desviación estándar de los datos utilizados en la validación, sin decimales, calculada con la siguiente fórmula:

$$s = \pm \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N-1}}$$

La incertidumbre para $\delta^{18}\text{O}$ es de $\pm 0,2\%$ y $\pm 0,3\%$ para IRMS y espectroscopía laser respectivamente y para $\delta^2\text{H}$ es de $\pm 1\%$ (INGEIS, 2005; IAEA, 1992).