# PROPUESTA DE ÁREAS PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL EN SALAR DE CAUCHARI-OLAROZ

PREPARADO POR:
Berta Morales, Felipe Páez, Damián Córdoba, Paulo Herrera (Asesor)

REVISADO POR:
Álvaro Henríquez

**MINERA EXAR**

Santiago, septiembre de 2016

# Resumen Ejecutivo

Este documento presenta un análisis actualizado de la componente hidrológica de la cuenca de los salares de Caucharí y Olaroz, con el objeto de identificar las zonas que presentan un mejor potencial como fuente para abastecer de agua industrial el proyecto. La información que se presenta corresponde en mayor parte a información incluida en presentaciones anteriores, además de nueva información levantada en campañas recientes. Toda la información ha sido reinterpretada en un nuevo balance hídrico de la cuenca a nivel de subcuentas aportantes. Se concluye con una propuesta de ubicación y cantidad de captaciones necesarias para cumplir con la demanda de agua industrial del proyecto.

Considerando el análisis y reinterpretación de los datos existentes en cuanto a la disponibilidad de agua, ubicación del proyecto y extensión de la propiedad minera, se han definido dos zonas para el abastecimiento de agua industrial del proyecto, las cuales corresponden en orden de prioridad al delta del río Rosario y el Cono de Archibarca. En consideración de las características hidrológicas e hidroquímicas del recurso, y para minimizar el impacto sobre afluentes superficiales, se recomienda utilizar captaciones subterráneas para el abastecimiento de agua industrial.

El requerimiento de agua industrial del proyecto ha sido estimado en un caudal equivalente a 120 litros por segundo (l/s) durante un período de 40 años de operación, equivale a 151 millones de $m^3$. Ese volumen debe compararse a las estimaciones de volúmenes de agua subterránea embalsada en los acuíferos de ambos sectores propuestos. En una situación sin recarga durante todo el periodo de operación del proyecto, el abastecimiento de agua industrial equivale al 40% del agua embalsada en el cono Archibarca y menos del 3% del volumen embalsado en el sector del río Rosario.

No obstante, lo anterior se debe considerar que el criterio adoptado en el proyecto para asegurar un uso sustentable de los recursos subterráneos a lo largo de toda su operación, considera que el caudal máximo a ser extraído debe ser igual o inferior a la recarga media anual de los sectores considerados para la extracción de agua industrial. El caudal potencial que pueden extraer actualmente tanto Exar (25 l/s) como Orocobre (20 l/s (NI 43-101)) desde el sector de Archibarca continúan siendo inferiores a las nuevas estimaciones de recarga para esta subcuenca (87 l/s). Sin embargo, en una perspectiva conservadora en cuanto a garantizar la sostenibilidad a largo plazo de las extracciones desde la zona del Cono de Archibarca, no se considera instalar nuevas captaciones subterráneas en ese sector. Consecuentemente, se recomienda que los nuevos pozos para abastecimiento de agua industrial que complementen la producción del pozo actual en Archibarca (PBI), se ubiquen en la zona del delta del río Rosario. El caudal total a ser extraído del sector del delta del río Rosario se estima que no excederá los 100 l/s más un 20% de contingencia, el cual corresponde a menos del 10% del caudal promedio de recarga estimada para la cuenca Rosario-Toro (1193 l/s). Se estima que este caudal puede ser extraído sosteniblemente a través de 5 pozos de bombeo ubicados dentro de la propiedad minera.

# 1. Introducción

Este documento sintetiza la información existente que fue considerada de utilidad para la definición de sectores aptos para la instalación de pozos para el abastecimiento de agua industrial. La información que se presenta corresponde en mayor parte a información incluida en documentos anteriores, pero también incorpora información más reciente disponible en bases de datos internas y nuevas interpretaciones de la información existente, además de nuevas estimaciones de los flujos superficiales y subterráneos, recargas y almacenamiento de agua subterránea.

# 2. Antecedentes consultados|

a. The Cauchari Salar Sedimentology. Final Report (2011), G. Bossi.
b. Feasibility Study Reserve Estimation and Lithium Carbonate and Potash Production at the Cauchari-Olaroz Salars, Jujuy Province, Argentina (2012). NI 43-101 Technical Report, Lithium Americas.
c. Prospección Geofísica para la Determinación de los Márgenes del Salar y Prospección de Aguas Subterráneas. Salar de Olaroz-Cauchari (2011). Grupo Interdisciplinario de Gestión Ambiental.
d. Prospección Geofísica en Cono de Archibarca. Salar de Cauchari (2010). Grupo Interdisciplinario de Gestión Ambiental.
e. Informe de Impacto Ambiental. Proyecto Salares Cauchari-Olaroz Minera Exar S.A. (Dic/2011). Ausenco Vector.
f. Actualización de Informe de Impacto Ambiental del Proyecto Salares de Olaroz-Cauchari. Etapa de Exploración (Sep/2011). Ausenco Vector.
g. Informe de Impacto Ambiental Etapa Explotación (Jul/2015). Minera Exar S.A. Salar de Cauchari Olaroz. Ausenco.
h. Technical Report on the Olaroz Lithium-Potash Project. NI 43-101 Orocobre Ltd. (May/2011). J. Houston & M. Gunn.
i. Technical Report on the Olaroz Project. NI 43-101 Orocobre Ltd. (Apr/2010). J. Houston & P. Ehren.
j. Informe Plataforma Pozo de Agua Industrial Pozos: PPI1 y PBI1. Salar de Cauchari. Conhidro.
k. Technical Memorandum: Water Balance and Freshwater Inflow Estimation for the Cauchari-Olaroz Watershed (Jul/2011). Aquaresource Inc.
l. Evaluación de la Geomorfología Ambiental en el Salar de Cauchari (May/2011). A. Ahumada.
m. Modelo Climatológico Salar Cauchary. Proyecto Salares Cauchary-Olaroz (May/2011). Lithium Americas Corp.
n. Definitive Feasibility Study for Olaroz Project. Final Report (May/2011). Sinclair Knight Mertz (SKM) para Orocobre.
o. Geophysical Report. Transient Electromagnetic Surveys at the Cauchari Project. Minera EXAR S.A. (Sep/2010). Quantec Geoscience Argentina S.A.
p. Informe Final. Plataforma Multinivel Este. Pozos: PT-1 y PT-1. Salar de Cauchari. Conhidro.
q. Base de Datos Hidrológica Integrada. Subsecretaría de Recursos Hídricos, Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Argentina. (SSRH) (http://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/subsecretaria-rh.php)

r. Base de Datos Mensuales de Precipitación del Noroeste Argentino. Servicio Meteorológico Nacional. (SMN). (http://anterior.inta.gob.ar/prorenoa/info/resultados/Precip_NOA/base_precipitaciones_noa.asp)
s. Evaporation in the Atacama Desert, Houston 2006.
t. A recharge model for high altitude arid Andean aquifer, Houston 2009.
u. Resumen Aforos EXAR – Visita 13 de Mayo. Comparación de caudales aforados con distintos métodos.
v. L:\Info Data Room\4.0 Technical Reports\4.9 Cauchari- Olaroz project geology & hydrogeology
w. Y:\CAUCHARI\200_TASK\208_AguaIndus\02_Datos_Brutos\01_Hidrologia\Resumen Aforos EXAR – Visita 13 Mayo.xls
x. Base de Datos: Base_Lac_09062016 con coordenadas y niveles piezométricos de pozos de monitoreo, puntos de aforo de caudales, etc.
y. Base de Datos: MONITOREO_DE_AGUA_SUPERFICIA-AL 09-06-2016 con información de niveles piezométricos y aforos de caudales superficiales.

# 3. Caracterización hidrometeorológica

En esta sección se discuten los principales aspectos de las características hidrometeorológicas de la cuenca de los salares de Cauchari y Olaroz.

## 3.1 Precipitaciones

Las precipitaciones dentro de las cuencas aportantes a los salares de Cauchari y Olaroz se distribuyen de forma muy irregular como consecuencia de la topografía del Noroeste Argentino, la que genera una influencia orográfica importante en los patrones de precipitación de la zona.

### 3.1.1 Información disponible

El registro utilizado para la caracterización de las precipitaciones de la zona se obtuvo del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN), de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de Argentina (SSRH) y de estaciones privadas de Exar S.A (Tabla 3.1). Para la zona de estudio se identificó en promedio una estación cada 2000 $km^2$, cuya ubicación se muestra en la Figura 3.1**.**

| ID | Nombre | Lat | Lon | msnm | Frec. | Perido | Fuente |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Colanzuli | 22°53'17"S | 65°13'27"W | 3575 | Diaria | 1991-2013 | SSRH |
| 2 | Iruya | 22°47'44'S | 65°12'57"W | 2741 | Diaria | 1982-2015 | SSRH |
| 3 | San Isidro | 22°45'24"S | 65°14'30"W | 2956 | Diaria | 1983-2015 | SSRH |
| 4 | El Pabellón | 22°33'13"S | 65°20'21"W | 4265 | Diaria | 1984-2015 | SSRH |
| 5 | Tuc Tuca | 22°24'16"S | 65°16'03"W | 3950 | Diaria | 1982-2015 | SSRH |
| 6 | Vaisala | 23°42'00"S | 66°45'36"W | 3900 | Diaria | 2011/2015 | Exar S.A. |
| 7 | Metboros | 23°27'36"S | 66°37'48"W | 3915 | Diaria | 2010/2011 | Exar S.A. |
| 8 | Metsulfatera | 23°43'12"S | 66°48'00"W | 3915 | Diaria | 2010/2011 | Exar S.A. |
| 9 | Abra Laite | 23°11'00"S | 65°47'00"W | 3620 | Mensual | 1972/1990 | SMN |
| 10 | Abra Pampa INTA | 22°49'00"S | 65°48'00"W | 3450 | Mensual | 1969/1990 | SMN |
| 11 | Castro Tolay | 23°21'00"S | 66°04'48"W | 3438 | Mensual | 1972/1990 | SMN |
| 12 | Coranzuli | 23°02'00"S | 66°24'00"W | 4100 | Mensual | 1972/1996 | SMN |
| 13 | Mina Concordia | 24°12'00"S | 66°24'00"W | 3770 | Mensual | 1950/1990 | SMN |
| 14 | Olacapato | 24°07'00"S | 66°43'00"W | 4100 | Mensual | 1950/1990 | SMN |
| 15 | Puesto Sey | 23°55'00"S | 66°34'00"W | 3920 | Mensual | 1973/1990 | SMN |
| 16 | Salar Pocitos | 24°23'00"S | 67°00'00"W | 3600 | Mensual | 1950/1990 | SMN |
| 17 | S.A.Cobres | 24°13'00"S | 66°19'00"W | 3775 | Mensual | 1949/1990 | SMN |
| 18 | Susques | 23°26'00"S | 66°30'00"W | 3675 | Mensual | 1972/1996 | SMN |

Tabla 3.1: Estaciones meteorológicas con registro de precipitaciones cercanas a la zona del proyecto (Sistema de Coordenadas WGS 84).

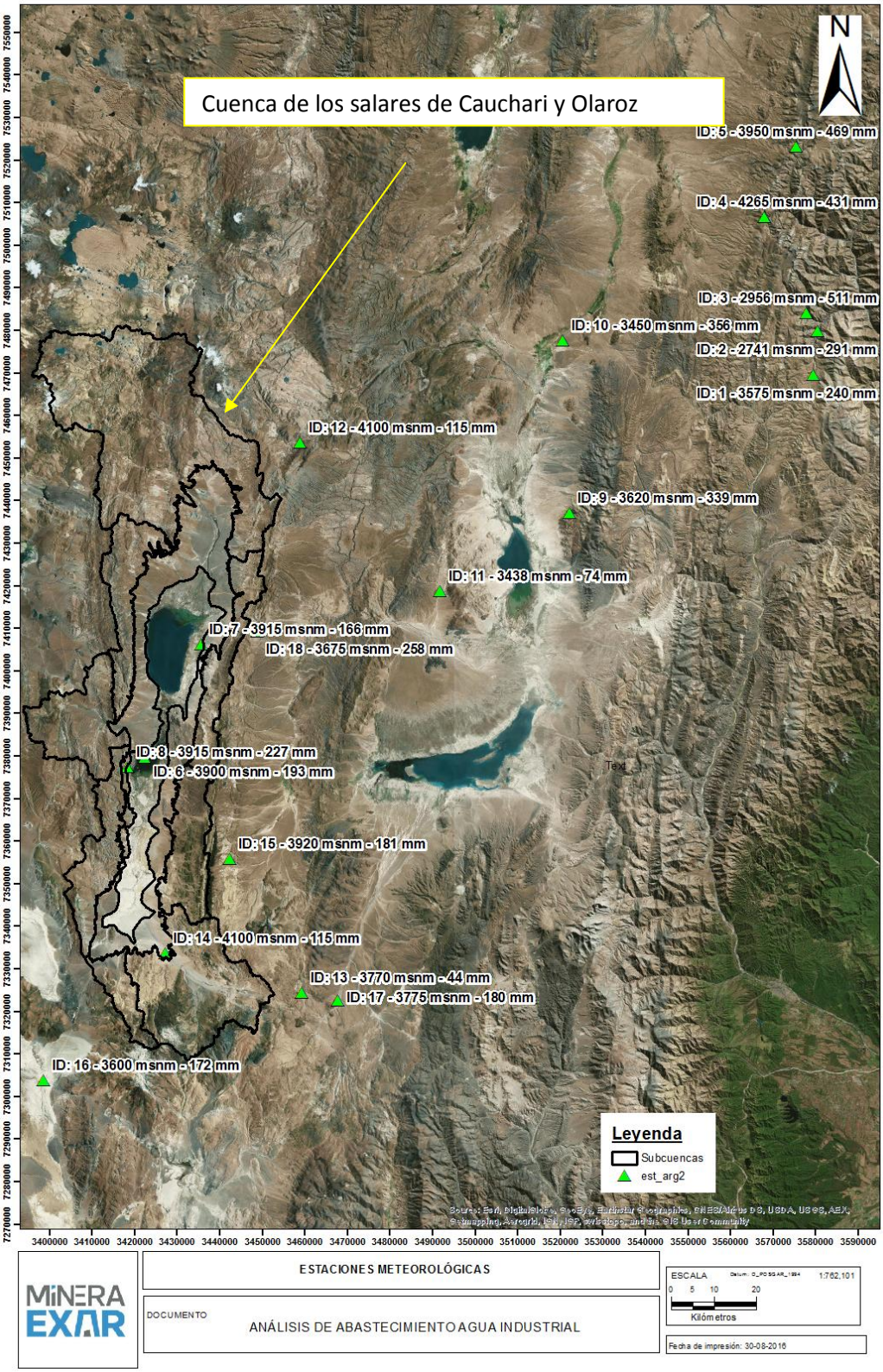



Figura 3.1: Ubicación de estaciones meteorológicas cercanas al proyecto con registro de precipitaciones.

En general, las estaciones operadas por el SSRH registran datos desde 1990 hasta 2015; las operadas por el SNM desde 1949 hasta 1996; y las operadas por Exar S.A, desde 2010 hasta 2015. La estación Vaisala continua en operación, pero por criterios de unificación, se consideró sólo hasta diciembre de 2015. La Tabla 3.2 muestra promedios mensuales de precipitación registrados en cada una de las estaciones y su respectiva desviación estándar.

| Estación | sep | oct | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Colanzuli | 2 (±2) | 7 (±5) | 14 (±5) | 37 (±12) | 72 (±12) | 59 (±15) | 39 (±12) | 9 (±5) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 1 (±1) |
| Iruya | 3 (±3) | 13 (±6) | 24 (±11) | 49 (±15) | 79 (±15) | 66 (±16) | 45 (±15) | 10 (±5) | 1 (±1) | 0 (±0) | 0 (±0) | 1 (±1) |
| San Isidro | 14 (±8) | 29 (±11) | 72 (±22) | 112 (±25) | 125 (±25) | 95 (±33) | 48 (±32) | 10 (±9) | 0 (±0) | 0 (±0) | 2 (±2) | 4 (±4) |
| El Pabellón | 14 (±9) | 31 (±13) | 74 (±19) | 109 (±21) | 93 (±17) | 68 (±22) | 29 (±17) | 6 (±6) | 0 (±0) | 1 (±1) | 2 (±2) | 4 (±4) |
| Tuc Tuca | 3 (±3) | 19 (±12) | 42 (±16) | 87 (±23) | 126 (±27) | 104 (±24) | 73 (±23) | 12 (±8) | 1 (±1) | 0 (±0) | 1 (±1) | 1 (±1) |
| Vaisala | 3 (±2) | 10 (±9) | 1 (±0) | 12 (±6) | 59 (±9) | 66 (±18) | 7 (±5) | 2 (±1) | 1 (±1) | 7 (±6) | 9 (±3) | 16 (±10) |
| Metboros modelo | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 58 (±0) | 63 (±9) | 6 (±2) | 0 (±0) | 10 (±0) | 10 (±0) | 19 (±0) | 0 (±0) |
| Metsulfatera modelo | 10 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 104 (±0) | 54 (±23) | 6 (±3) | 0 (±0) | 11 (±0) | 14 (±0) | 28 (±0) | 0 (±0) |
| Abra Laite | 1 (±1) | 2 (±2) | 28 (±26) | 58 (±26) | 98 (±37) | 80 (±27) | 65 (±33) | 6 (±4) | 1 (±1) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) |
| Abra Pampa INTA | 1 (±1) | 8 (±7) | 31 (±16) | 67 (±18) | 98 (±25) | 86 (±20) | 58 (±25) | 7 (±4) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) |
| Olacapato | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 11 (±11) | 34 (±19) | 23 (±16) | 5 (±5) | 0 (±0) | 0 (±0) | 1 (±1) | 0 (±0) | 0 (±0) |
| Mina Concordia | 0 (±0) | 0 (±0) | 3 (±3) | 17 (±10) | 48 (±25) | 36 (±22) | 11 (±11) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) |
| Salar Pocitos | 0 (±0) | 1 (±1) | 0 (±0) | 4 (±4) | 24 (±16) | 13 (±8) | 2 (±2) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) |
| SA Cobres | 0 (±0) | 0 (±0) | 4 (±4) | 18 (±12) | 48 (±22) | 32 (±16) | 13 (±12) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) |
| Susques | 0 (±0) | 1 (±1) | 8 (±8) | 34 (±17) | 70 (±28) | 46 (±19) | 20 (±12) | 1 (±1) | 1 (±1) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) |
| Puesto Sey | 0 (±0) | 0 (±0) | 4 (±4) | 22 (±11) | 60 (±27) | 67 (±31) | 18 (±9) | 1 (±1) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) |
| Castro Tolay | 0 (±0) | 1 (±1) | 10 (±8) | 44 (±38) | 65 (±31) | 34 (±17) | 26 (±13) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) |
| Coranzuli | 1 (±1) | 2 (±2) | 10 (±9) | 46 (±23) | 98 (±28) | 61 (±20) | 36 (±16) | 3 (±2) | 1 (±1) | 0 (±0) | 0 (±0) | 0 (±0) |

Tabla 3.2: Promedios y desviación estándar de precipitación media mensual (mm) registrada en estaciones meteorológicas cercanas a la zona del proyecto.

### 3.1.2 Variación estacional de precipitaciones dentro de la cuenca de los Salares de Cauchari y Olaroz

Dada la cercanía a la zona de estudio, la variación estacional de precipitaciones se caracterizó con el registro de las estaciones Vaisala (Exar. S.A. - 4 años continuos), Susques (SMN - 24 años continuos) y Olacapato (SMN - 36 años discontinuos). Los periodos con información en cada estación se muestran en la Figura 3.2, mientras que la Figura 3.3 muestra los valores de precipitación media mensual registrados en las tres estaciones.

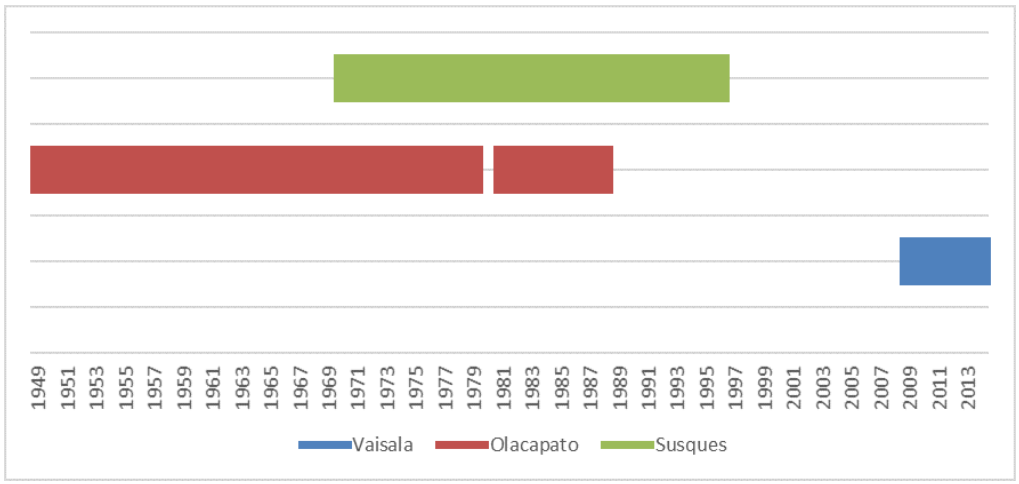



Figura 3.2: Períodos con información de precipitaciones en estaciones meteorológicas cercanas a la zona del proyecto.

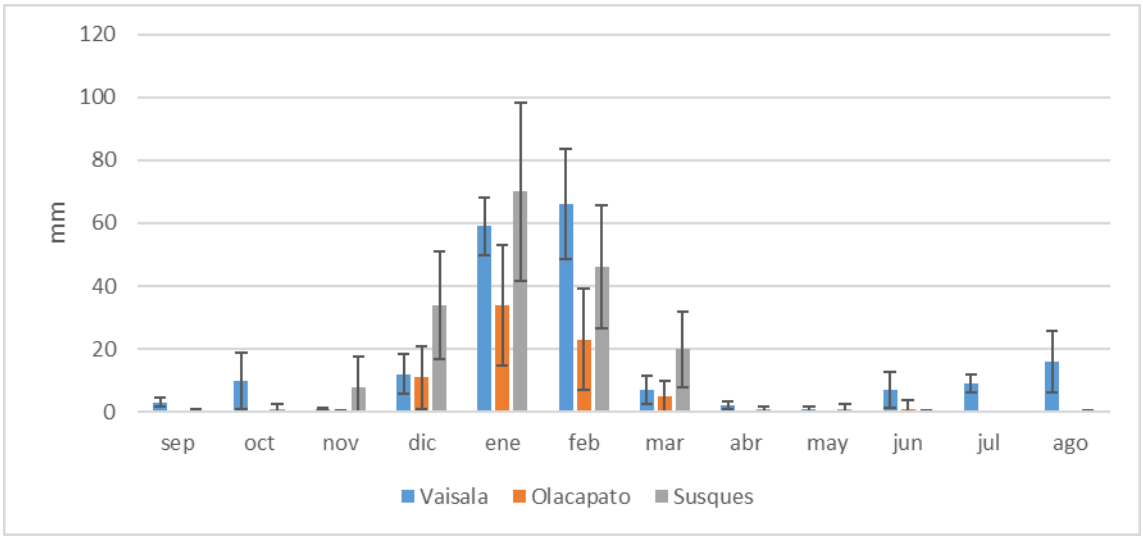



Figura 3.3: Valores promedio de precipitación mensual registrados en estaciones meteorológicas cercanas a la zona del proyecto. Barras indican desviación estándar de los promedios según mes.

A partir de la información analizada se concluye que:

- La estación Vaisala (2011-2015), ubicada en la parte central de la cuenca, registró eventos de precipitación líquida de relativa magnitud entre abril y octubre, meses en los cuales las estaciones del SMN presentan escaso o nulo registro (1949-1996).
- La parte sur del salar presenta menor aporte de precipitaciones que el resto de la cuenca. En promedio en la parte norte precipita 180 mm (Susques) al año, mientras que en el sur precipita 70 mm (Olacapato).

## 3.2 Evaporación potencial

El registro de evaporación potencial se obtuvo de la estación Vaisala ubicada a 3900 metros, la cual se registra a través de una bandeja de evaporación. En esta estación, la evaporación anual

promedio alcanza los 1900 mm. Este valor es similar al resultado (~1850 mm) de la expresión propuesta por Houston (2006) para calcular la evaporación potencial evaluada a la misma cota. Al comparar el valor de evaporación con el de la precipitación en la estación Vaisala, se tiene que la evaporación potencial excede 10 veces la precipitación promedio anual.

## 3.3 Registro fluviométrico y aforos

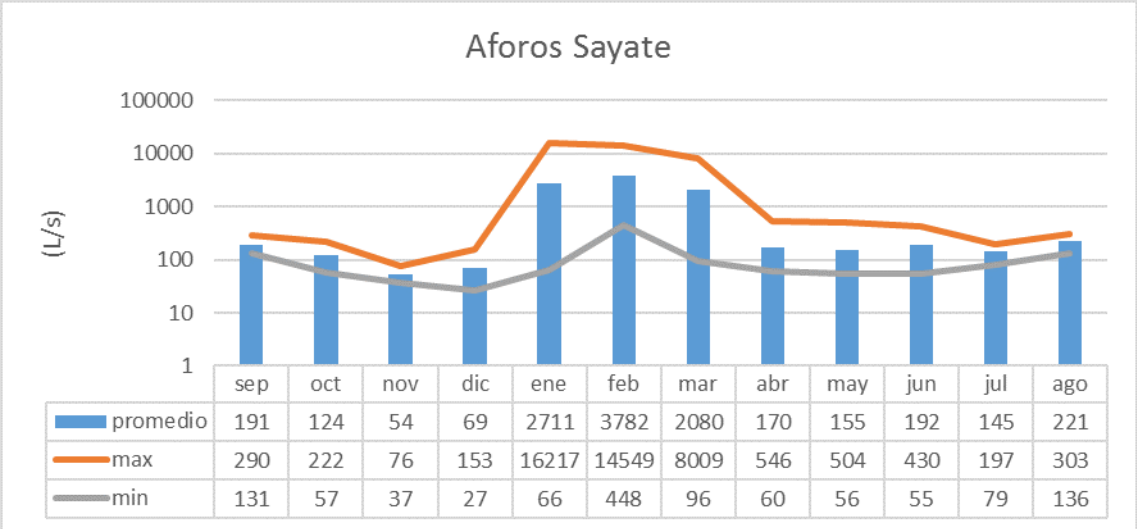
### 3.3.1 Estación fluviométrica y aforos del SSRH

La estación Sayate operada por el SSRH y ubicada en una cuenca inmediatamente vecina de los salares de Cauchari y Olaroz, es el único registro fluviométrico oficial que está cercano a la zona de estudio (Tabla 3.3). Esta estación presenta registro fluviométrico continuo entre agosto de 2009 hasta enero de 2011, y aforos puntuales desde 2009 hasta 2016.

| Estación | Rio | Área km$^2$ | Lat. | Lon. | msnm | Frec. | Periodo | Fuente |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sayate | Miraflores | 3200 | 22°54'03"S | 65°50'58"W | 3440 | Altura limnimétrica | 2009-2011 | SSRH |
| Sayate | Miraflores | 3200 | 22°54'03"S | 65°50'58"W | 3440 | Aforos mensuales | 2009-2016 | SSRH |

Tabla 3.3. Datos disponibles de aforos y altura limnimétrica.

La Figura 3.4 muestra los caudales mensuales estimados a partir de los 80 aforos realizados. Los caudales más altos ocurren entre diciembre y marzo, período en el cual se registra una alta variación diaria y horaria.




| | sep | oct | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| promedio | 191 | 124 | 54 | 69 | 2711 | 3782 | 2080 | 170 | 155 | 192 | 145 | 221 |
| max | 290 | 222 | 76 | 153 | 16217 | 14549 | 8009 | 546 | 504 | 430 | 197 | 303 |
| min | 131 | 57 | 37 | 27 | 66 | 448 | 96 | 60 | 56 | 55 | 79 | 136 |

Figura 3.4: Valor promedio, máximo y mínimo de los 80 aforos realizados en el punto Sayate.

El comportamiento de la estación Sayate (Anexo 1) es similar al observado en otras cuencas altiplánicas (SSRH): grandes avenidas durante el verano como resultado del invierno altiplánico y bajos caudales durante el resto del año. Este comportamiento se debe a dos factores: disminución de la precipitación entre abril y noviembre, y disminución de la temperatura del aire en estos meses lo que resulta en la acumulación de la precipitación caída en forma de nieve o hielo.

### 3.3.2 Aforos Exar S.A.

Desde enero 2010 hasta la fecha, se han realizado una serie de mediciones puntuales de caudal y de parámetros fisicoquímicos en la cuenca de los salares de Cauchari y Olaroz. Dada las características de los escurrimientos superficiales de la zona en cuanto a caudales, geometría variable, topografía, etc.; y a las bajas temperaturas que se registran durante la noche en algunos meses del año, lo cual produce el congelamiento de cursos superficiales; se han probado distintas técnicas de aforo de caudales, entre las que se cuentan: método volumétrico, registro de velocidades con molinete y estimaciones de velocidad superficial con flotador. La Tabla 3.4 resume las coordenadas de los puntos de aforo y la Figura 3.5 muestra su ubicación.

| Nombre | Subcuenca | Este | Norte | Descripción |
|---|---|---|---|---|
| CSW-01 | Cauchari | 3427472 | 7347313 | Qda.SE (Afluente E1) |
| CSW-02 | Cauchari | 3443076 | 7325887 | Tocomar Norte |
| CSW-03 | Cauchari | 3443023 | 7325800 | Tocomar Sur |
| CSW-04 | Cauchari | 3438517 | 7326202 | Tocomar AAB Puente |
| CSW-05 | Cauchari | 3433525 | 7323817 | Rio Antuco |
| CSW-06 | Cauchari | 3430917 | 7330875 | Rio Tocomar Puente Esquina Azul |
| CSW-07 | Cauchari | 3427099 | 7330144 | Rio Quevar |
| CSW-08 | Cauchari | 3426085 | 7329866 | Quebrada Los Berros |
| CSW-09 | Cauchari | 3420189 | 7350036 | Puente Centro Sur Cauchari |
| CSW-10 | Cauchari | 3419088 | 7348788 | Vert. Centro Sur Cauchari 1 |
| CSW-11 | Cauchari | 3418228 | 7344331 | Vert. Centro Sur Cauchari 2 |
| CSW-12 | Cauchari | 3408803 | 7349479 | Quebrada Arizaro |
| CSW-13 | Cauchari | 3407835 | 7341824 | Quebrada Guayar |
| CSW-14 | Cauchari | 3421128 | 7388236 | Archibarca cruce R N°70 |
| OSW-01 | Olaroz | 3431991 | 7443033 | Rio Rosario Puente AAR |
| OSW-02 | Olaroz | 3413444 | 7388236 | Vega Archibarca |
| OSW-03 | Olaroz | 3436765 | 7423601 | R. Rosario cruce R16 |
| OSW-06 | Olaroz | 3448528 | 7436453 | Vertiente Puesto Tanque |
| OSW-07 | Olaroz | 3436101 | 7436407 | Afluente 3 NW Ruta 70 |
| OSW-08 | Olaroz | 3445472 | 7424701 | Lari Paraje La Vicuñita |
| OSW-09 | Olaroz | 3446731 | 7419719 | Rio Lari chico |

Tabla 3.4: Coordenadas UTM de puntos de aforo de caudales referidas a proyección POSGAR 94/ Argentina3.

Los aforos muestran que los caudales de los ríos y arroyos tienen un comportamiento muy disímil en cuanto a magnitud en el transcurso de un mismo día. También se observan diferencias significativas de caudales entre meses consecutivos. Dependiendo de la época del año y de las precipitaciones registradas, los cursos superficiales que alimentan los salares y escurren a través de abanicos aluviales, desaparecen antes de alcanzar los márgenes del salar debido a la alta tasa de infiltración superficial de los sedimentos. La Tabla 3.5 resume el número de mediciones mensuales para cada punto de aforo.

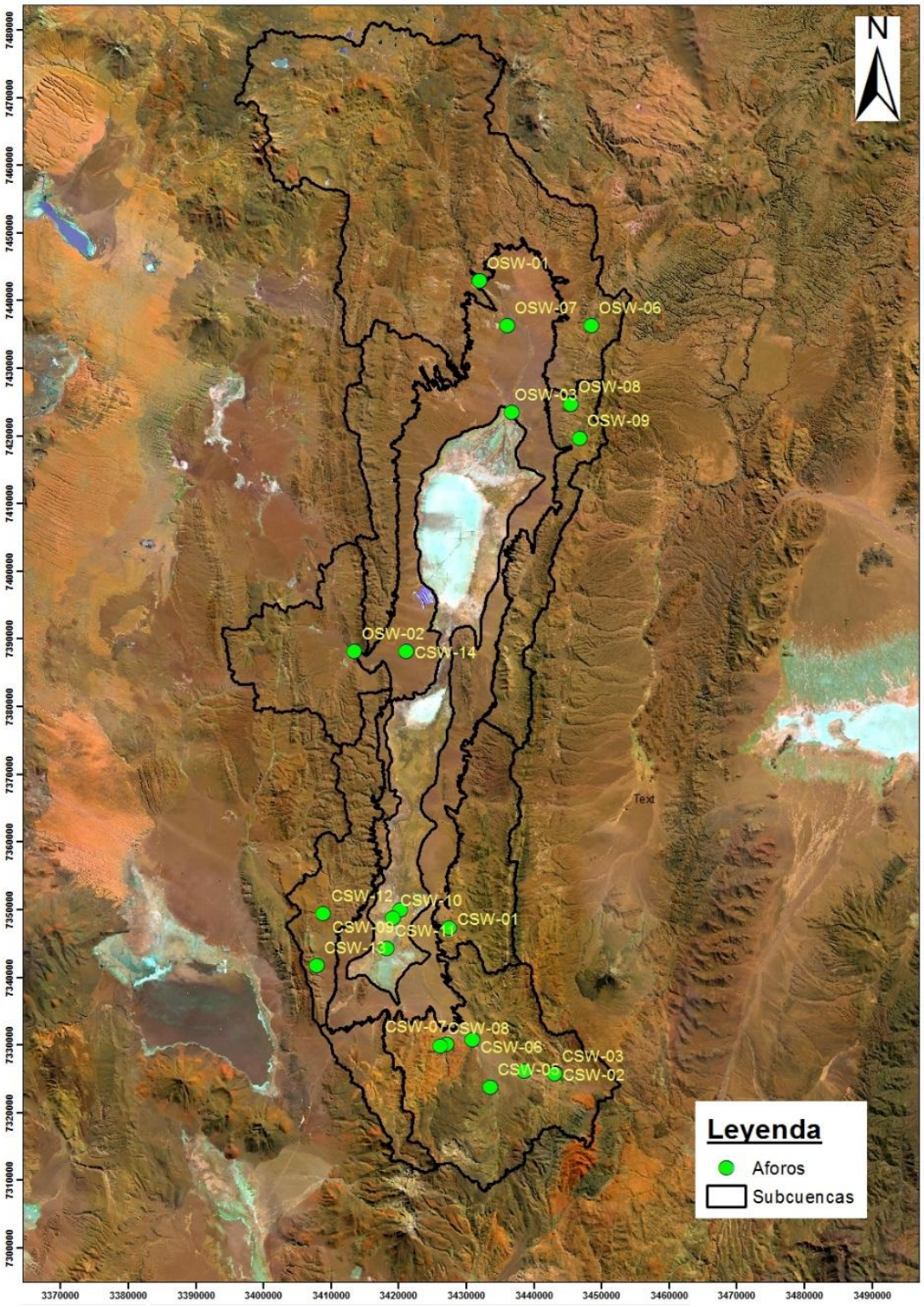



Figura 3.5: Ubicación de puntos de aforos realizados por Exar.

| Punto | sep | oct | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OSW-01 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 0 | 1 | 7 | 4 | 9 | 3 | 5 |
| OSW-02 | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 5 | 3 | 5 | 3 | 3 |
| OSW-03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSW-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSW-07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSW-08 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OSW-09 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CSW-01 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 | 6 | 2 | 5 |
| CSW-02 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 2 | 4 |
| CSW-03 | 2 | 3 | 4 | 3 | 1 | 3 | 3 | 6 | 8 | 9 | 2 | 5 |
| CSW-04 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 1 | 3 |
| CSW-05 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 1 | 5 |
| CSW-06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| CSW-07 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 5 | 5 | 6 | 2 | 5 |
| CSW-08 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 3 | 2 | 4 | 4 | 5 | 2 | 4 |
| CSW-09 | 1 | 2 | 3 | 1 | 0 | 1 | 4 | 4 | 3 | 5 | 1 | 3 |
| CSW-10 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CSW-11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| CSW-12 | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 5 | 6 | 0 | 4 |
| CSW-13 | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 5 | 6 | 2 | 5 |
| CSW-04 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Total Olaroz** | **1** | **3** | **6** | **4** | **7** | **22** | **11** | **14** | **7** | **14** | **6** | **8** |
| **Total Cauchari** | **9** | **20** | **29** | **19** | **8** | **28** | **33** | **43** | **48** | **58** | **15** | **45** |
| **Total** | **10** | **23** | **35** | **23** | **15** | **50** | **44** | **57** | **55** | **72** | **21** | **53** |

Tabla 3.5: Distribución del número de aforos por punto, salar y por mes.

Aforos Cuenca Salar Olaroz

Dado que el punto OSW-01 no tiene registro en febrero y que el punto OSW-03 se encuentra aguas abajo del punto OSW-01, los caudales aforados en OSW-03 se han transpuesto por un factor de área igual a 0.51 al punto OSW-01, de tal forma de completar la estadística anual del punto OSW-01. A continuación, en la Figura 3.6 se visualizan los valores medios mensuales registrados en OSW-01. Los registros presentan un comportamiento muy similar al observado en la estación Sayate, en la cual los caudales de crecida ocurren en el periodo de mayor precipitación, luego del cual descienden durante el resto del año. En términos de magnitud, los caudales de crecida observados son un orden de magnitud mayor respecto al mínimo registrado.

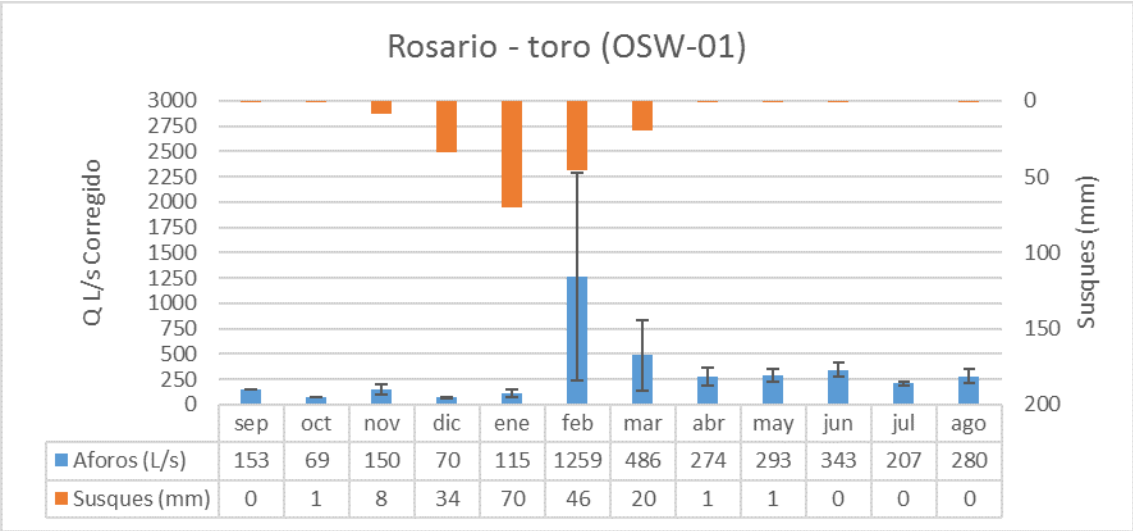



Figura 3.6: Serie de caudales medios para el punto OSW-01. Datos corresponden a mediciones en OSW-01 completadas con valores registrados en OSW-03 corregidos por un factor de área.

La Figura 3.7 muestra el promedio de los caudales registrados en una sección de control ubicada cerca del ápice del Cono de Archibarca (OSW-02). En este caso, los caudales máximos se registran principalmente en diciembre, pero debido a que no se observa una diferencia significativa en magnitud entre los caudales, no se puede inferir que los caudales registrados corresponden efectivamente a los caudales de crecidas. Por lo tanto, se considera que los aforos realizados no son suficientes para caracterizar correctamente el comportamiento de los caudales de esta subcuenca.

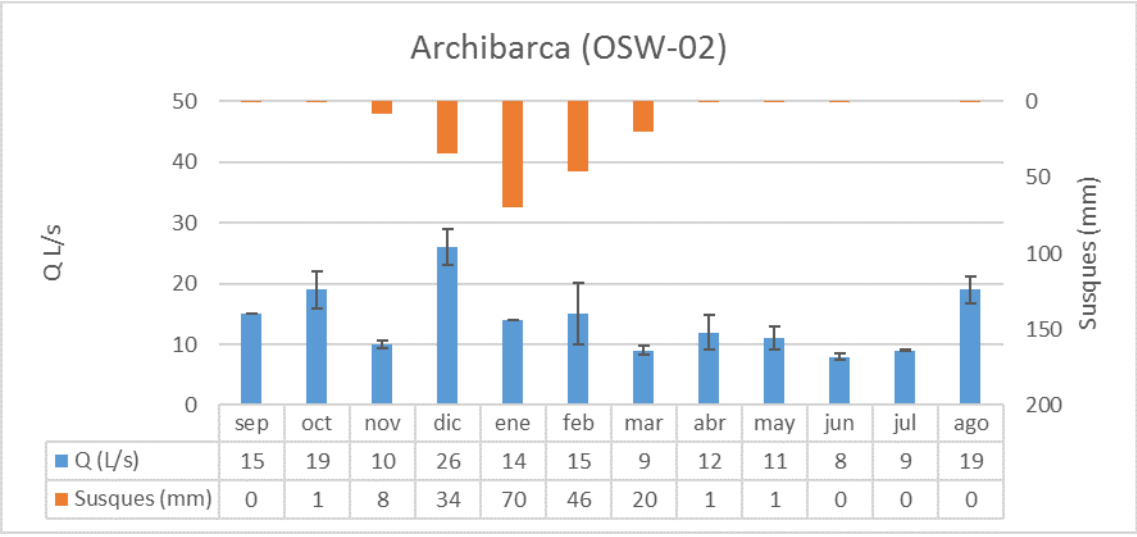



Figura 3.7: Caudales promedios medidos en el punto OSW-02. Barras indican valores máximos y mínimos.

La Tabla 3.6 muestra los caudales medidos en otros puntos de la cuenca de Olaroz. Los puntos OSW-06, OSW-07, OSW-08 y OSW-09 se ubicaron en distintos cruces de caminos con quebradas,

mientras que el aforo en el punto CSW-14 se realizó en el cono de Archibarca, aguas abajo del punto OSW-02, el cual permite verificar las crecidas poco frecuentes del río Ola (o Archibarca).

| Punto | sep | oct | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OSW-06 | | | | | 0.4 | | | | | | | |
| OSW-07 | | | | | | | 1.5 | | | | | |
| OSW-08 | | | | | 0.7 | | 1.4 | | | | | |
| OSW-09 | | | | | 0.3 | | | | | | | |
| CSW-14 | | | | | | 1170.8 | | | | | | |

Tabla 3.6: Caudales medidos (l/s) en otras subcuencas del salar de Olaroz.

Aforos Cuenca Salar Cauchari

La Tabla 3.7 muestra el valor medio de los caudales aforados en las cuencas aportantes al salar de Cauchari. A excepción del punto CSW-07, ningún otro punto presenta un registro que permita identificar claramente el caudal máximo entre diciembre y marzo. Más aún, el bajo número de aforos entre diciembre y marzo (ver Tabla 3.5) crea la impresión de que el caudal máximo en algunos ocurriera fuera de esos meses.

| Punto | sep | oct | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CSW-01 | 1.6 | 1.3 | 1.6 | 1.1 | 1.5 | 1.3 | 1.7 | 1.6 | 3.3 | 2.9 | 1.7 | 2.7 |
| CSW-02 | 14.6 | 19.2 | 10.3 | 25.9 | 14.4 | 15.0 | 9.0 | 11.5 | 11.0 | 7.9 | 9.0 | 18.7 |
| CSW-03 | 50.2 | 31.4 | 29.2 | 54.4 | 35.5 | 66.1 | 24.6 | 36.2 | 41.6 | 40.4 | 25.0 | 34.7 |
| CSW-04 | 57.8 | 49.8 | 41.0 | 74.8 | 74.2 | 114.6 | 48.4 | 52.1 | 61.5 | 55.6 | 55.2 | 57.3 |
| CSW-05 | 11.0 | 10.9 | 11.3 | 12.9 | 11.6 | 12.2 | 9.1 | 11.0 | 11.6 | 12.0 | 14.3 | 16.0 |
| CSW-06 | | | | | | | 11.1 | 1.9 | | | | 45.0 |
| CSW-07 | 44.7 | 44.0 | 26.5 | 47.4 | 24.4 | 40.4 | 3807.8 | 47.9 | 61.2 | 61 | 368.3 | 64.5 |
| CSW-08 | 2.5 | 2.8 | 4.0 | 3.7 | | 3.3 | 2.5 | 8.4 | 2.5 | 2.0 | 3.0 | 7.6 |
| CSW-09 | 13.3 | 3.3 | 6.6 | 0.3 | | 6.6 | 5.3 | 2.6 | 4.6 | 3.8 | 3.8 | 4.5 |
| CSW-10 | | | 0.1 | 0.2 | | | 0.1 | | | | | |
| CSW-11 | | | | | | | | 5.9 | | | | 0.4 |
| CSW-12 | | 1.0 | 0.8 | 1.5 | 0.1 | 1.0 | 0.3 | 0.5 | 1.0 | 0.7 | | 1.0 |
| CSW-13 | | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.9 | 0.7 | 1.1 | 0.4 | 0.8 |

Tabla 3.7: Promedio de aforos (l/s) en cuenca Cauchari. Valores máximos se indican en rojo.

En conclusión, el número de aforos no es suficiente para caracterizar por sí solo el régimen hidrológico, en particular, para caracterizar el periodo de crecidas pluviales que se registran entre diciembre y marzo, periodo para el cual existe menos información que para otros meses.

## 3.4 Estimaciones previas de recarga

Para estimar la recarga al Salar proveniente de las distintas cuencas de la zona de estudio mostradas en la Figura 3.8, en el año 2011 se desarrolló un modelo hidrológico utilizando el software HEC-HMS.

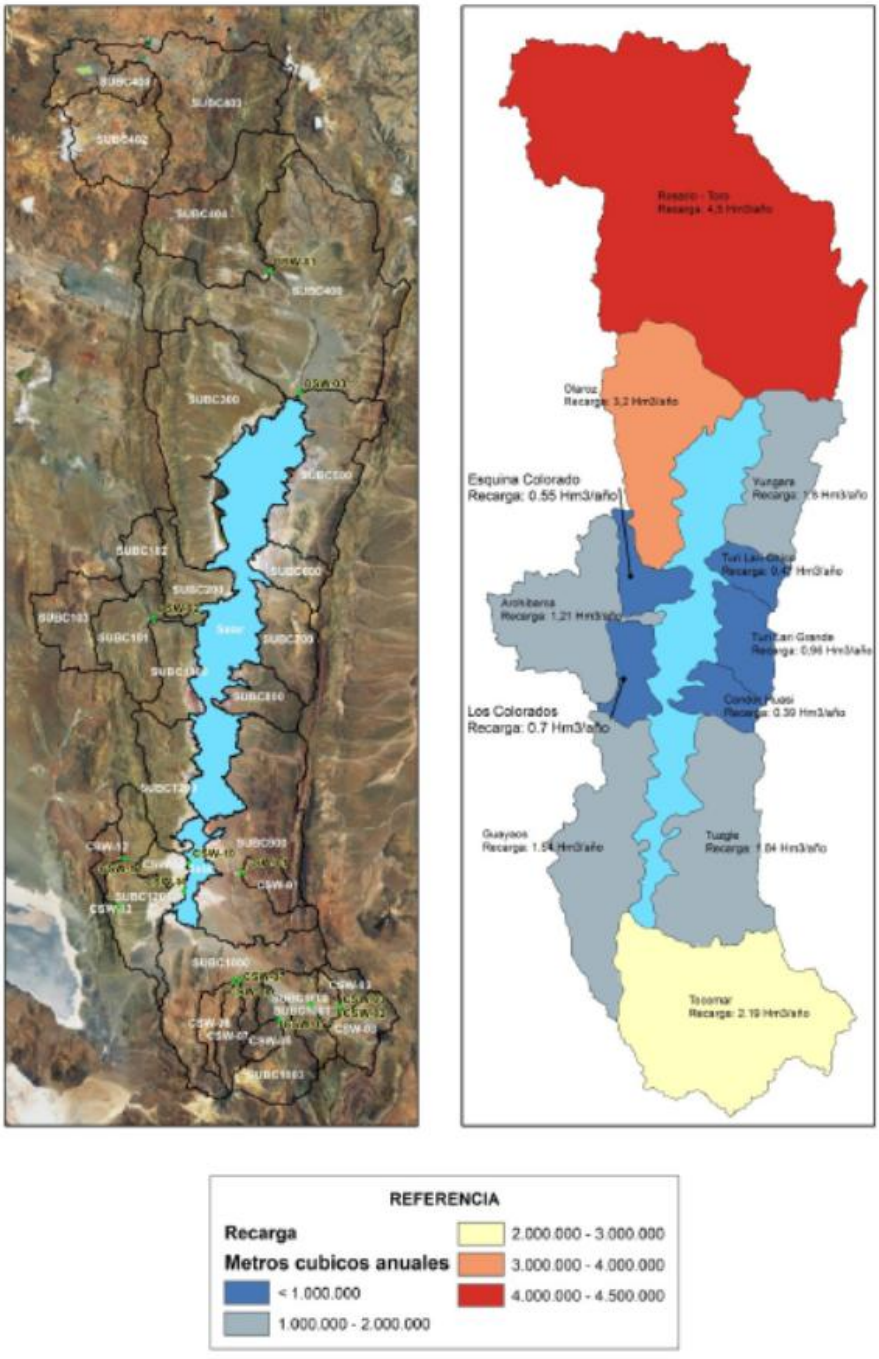



**Figura 2. 65. Ingresos medios anuales para cada subcuenca del salar.**

Figura 3.8: Subcuencas consideradas en el modelo HEC-HMS para la estimación de la recarga.

Algunos de los antecedentes y/o supuestos en que se basó el modelo son los siguientes:

- Para la calibración del modelo se utilizaron los datos registrados durante un año en la estación MetBoros. Para las simulaciones de la variabilidad de las precipitaciones sobre un periodo más prolongado de tiempo, se utilizó el registro de la estación de Olacapato (SMN).

- El modelo hidrológico divide la cuenca en 31 subcuencas que son representadas como volúmenes de almacenamiento mediante un modelo lineal para representar la escorrentía.

- Los datos de las estaciones meteorológicas fueron extrapolados a sectores de mayor altitud asumiendo una relación que modela un descenso en los valores de precipitación con la altura.

- El registro de caudales observados muestra un desfase entre temporada de lluvias y periodo de máximos caudales. El modelo intenta explicar lo anterior a través de un algoritmo que considera una profundidad máxima para la evaporación que ocurre desde el suelo.

- Dado que en términos mensuales el balance hídrico es negativo, es decir: la evapotranspiración es mayor a la precipitación, el modelo hidrológico fue desarrollado a nivel diario, de tal forma de representar mejor los procesos de infiltración de la escorrentía superficial y la evapotranspiración efectiva que ocurre desde el suelo. Esto último se modela a través de una profundidad máxima de evaporación efectiva.

- La entrada de datos diarios de precipitación al modelo fue generada usando un generador estocástico (MODAWEC) para distribuir los valores de precipitación mensual medidos en las estaciones con mayor periodo de observación, de acuerdo a los datos de precipitación diaria registrados en las estaciones automáticas instaladas como parte del proyecto.

- El modelo hidrológico fue desarrollado en HEC-HMS y se consideró que la precipitación se divide en dos componentes: evapotranspiración y flujo base.

- Otras limitaciones del modelo son que no puede representar infiltraciones del flujo regional de agua subterránea, ni a nivel intercuenca.

- En base a los resultados del modelo, se estimó que sólo una pequeña parte del agua precipitada alcanza a escurrir fuera de las cuencas. La mayor parte de las precipitaciones en rangos de hasta 97% se evapora antes de alcanzar los salares.

- De acuerdo al balance hídrico global de la cuenca se estimó que el río Rosario contribuye la mayor cantidad de agua al salar (aprox. 24%).

- En base a los resultados del modelo hidrológico se estimaron flujos medios de recarga hacia el salar resumidos en la Tabla 3.8, los cuales corresponden al flujo base estimado para cada subcuenca.

| Cuenca | Q ($Hm^3$/año) | Q (L/s) | Área ($km^2$) |
|---|---|---|---|
| Condor Huasi | 0,398 | 12,6 | 88,48 |
| Esquina Colorada | 0,554 | 17,6 | 96,11 |
| Turi Lari Chico | 0,474 | 15,0 | 73,79 |
| Los Colorados | 0,721 | 22,9 | 106,29 |
| Archibarca | 1,215 | 38,5 | 357,47 |
| Turi Lari Grande | 0,964 | 30,6 | 132,35 |
| Guayaos | 1,549 | 49,1 | 494,76 |
| Tuzgle | 1,84 | 58,3 | 473,62 |
| Yungara | 1,86 | 59,0 | 283,52 |
| Tocomar | 2,196 | 69,6 | 768,97 |
| Olaroz | 3,221 | 102,1 | 454,94 |
| Rosario Toro | 4,5 | 142,7 | 1901,42 |
| Total | 19,49 | 618,1 | 5231,72 |

Tabla 3.8: Cuencas y caudales aportantes a los salares de Cauchari y Olaroz. Fuente: Informes de Impacto Ambiental (2011-2015).

## 3.5 Nuevas estimaciones de recarga

Debido a que se recopiló información adicional después de la elaboración de las estimaciones de recarga discutidas en la sección precedente, se decidió efectuar una reinterpretación conjunta de los datos existentes y nuevos, al mismo tiempo de realizar una actualización y recalibración del modelo hidrológico. Los principales cambios efectuados fueron:

- Reinterpretación del régimen hidrológico de las cuencas de los salares de Cauchari y Olaroz. En el informe titulado “Water Balance and Freshwater Inflow Estimation for the Cauchari-Olaroz Watershed” (julio, 2011) se menciona que las crecidas se extienden en la estación seca. Sin embargo, el aforo OSW-03 y la estación Sayate mostraron que las crecidas en el Noroeste Argentino ocurren en los meses húmedos (diciembre- marzo). La conclusión anterior también se soporta por información proporcionada por la comunidad local sobre el comportamiento de los ríos y quebradas de la zona.
- Las estaciones Vaisala (2011-2015), Metboros (2010), Metsulfatera (2010) y Olacapato (SMN) se encuentran dentro de la cuenca de los salares Cauchari y Olaroz, sin embargo, las tres primeras tienen registros con una extensión temporal limitada entre 2010 y 2015, mientras que la última presenta registro desde 1950 hasta 1990, por lo tanto, para obtener la precipitación en la zona de estudio, la estación Susques (SMN) que inicialmente abarca desde 1972 hasta 1996, se extendió hasta el año 2013 utilizando la estación Colanzuli (SSRH), obteniéndose 40 años continuos (1972 – 2013) de registro (Anexo 2).
- La nueva interpretación de la información disponible indica un aumento de la precipitación con la altura, lo que contrasta con el supuesto de disminución de la precipitación con la altura considerado en el estudio anterior.
- Como parte de la actualización del modelo, se incorporaron nuevos aforos lo que permitió una mejora en la calibración.

En base a la nueva información disponible y a la reinterpretación de los datos existentes, el modelo se calibró nuevamente en los puntos OSW-01, OSW-02, CSW-01, CSW-02, CSW-03, CSW-04, CSW-05, CSW-07, CSW-08 y CSW-12. En la Tabla 3.9 se muestran los caudales medios anuales simulados por el modelo hidrológico actualizado en los distintos puntos de aforo.

| Cuenca | Q (L/s) | Área (km$^2$) |
|---|---|---|
| OSW-01 | 794 | 961 |
| OSW-02 | 75 | 333 |
| CSW-01 | 18 | 48 |
| CSW-02 | 26 | 29 |
| CSW-03 | 74 | 82 |
| CSW-04 | 119 | 134 |
| CSW-05 | 25 | 26 |
| CSW-07 | 110 | 61 |
| CSW-08 | 14 | 31 |
| CSW-12 | 5 | 13 |

Tabla 3.9: Caudales medios simulados con modelo hidrológico actualizado.

Las Figuras 3.9 y 3.10 muestran los caudales medios observados y simulados, y la precipitación promedio mensual en los puntos OSW-01 y OSW-02. Ambos puntos no presentaron registro de aforos representativo entre los meses de diciembre y marzo, por lo cual, la estimación de caudales de crecidas de dichos meses sólo puede validarse a través de la Figura 3.11, la cual compara los caudales de la estación Sayate con los simulados en el punto OSW-01. Esta figura indica que efectivamente existe un aumento significativo de caudales entre diciembre y marzo, los cuales no han sido registrados en las campañas de aforo de OSW-01 y OSW-02.

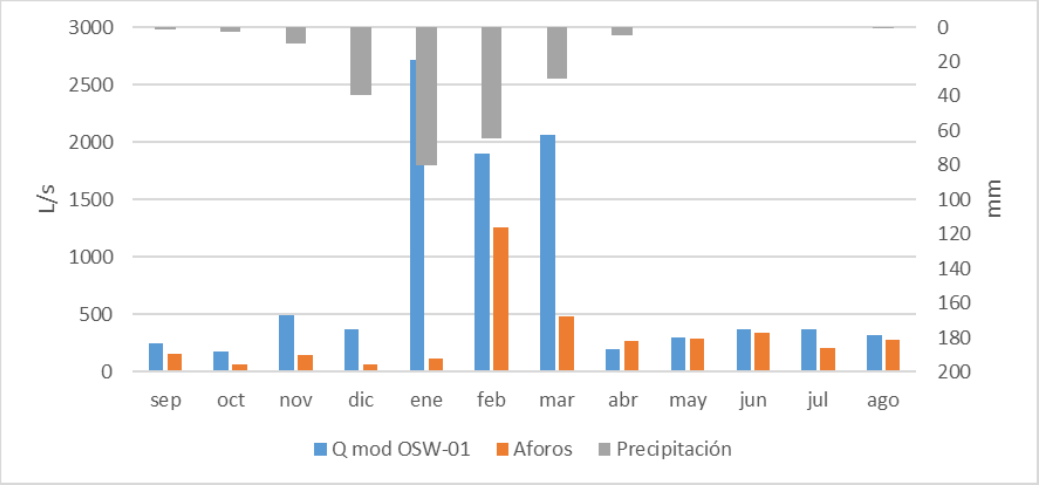



Figura 3.9. Resultados simulación de caudales medios mensuales en OSW-01.

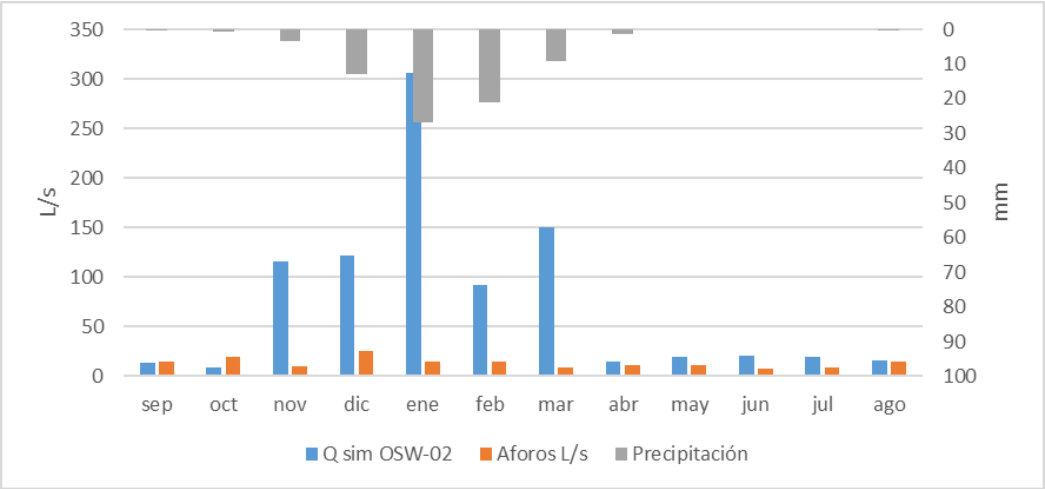



Figura 3.10. Resultados simulación de caudales medios mensuales en OSW-02.

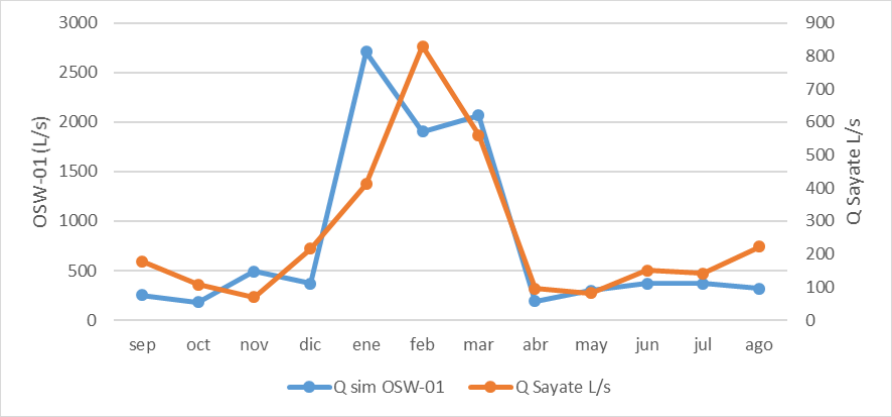



Figura 3.11. Comparación Caudales medios mensuales Sayate y simulados en OSW-01.

A partir de los resultados del modelo hidrológico actualizado se estimaron nuevos flujos medios de recarga hacia el salar, los cuales son la suma de los flujos base más la escorrentía directa, que se resumen en la Tabla 3.10.

| Cuenca | Área ($km^2$) | Recarga ($Hm^3$/año) | Recarga (L/s) |
|---|---|---|---|
| Rosario | 1582 | 37,62 | 1193 |
| Olaroz | 304 | 5,46 | 173 |
| Turi Lari | 285 | 4,54 | 144 |
| Archibarca | 373 | 2,74 | 87 |
| Guayaos | 293 | 3,22 | 102 |
| Tocomar | 685 | 19,27 | 611 |
| Tuzgle | 311 | 3,41 | 108 |
| Quevar | 136 | 1,86 | 59 |
| Total | 3969 | 78,11 | 2477 |

Tabla 3.10: Cuencas consideradas en la actualización del modelo hidrológico y nueva recarga estimada al Salar de Cauchari y Olaroz.

En la Tabla 3.11 se compara la recarga estimada para cada subcuenca a partir del modelo hidrológico con la precipitación media de cada área. La recarga estimada para toda la cuenca del Salar de Cauchari-Olaroz (2477 l/s) es equivalente al 12,4% de la precipitación media que ocurre en cada subcuenca (19968 l/s). En el caso de la subcuenca Rosario, la recarga es equivalente a un 10,4% de la precipitación media.

| Cuenca | Área ($km^2$) | PP media (L/s) | Recarga (L/s) | % Recarga/Pp |
|---|---|---|---|---|
| Rosario | 1582 | 11446 | 1193 | 10,4 |
| Olaroz | 304 | 2087 | 173 | 8,3 |
| Turi Lari | 285 | 1927 | 144 | 7,5 |
| Archibarca | 373 | 907 | 87 | 9,6 |
| Guayaos | 293 | 705 | 102 | 14,5 |
| Tocomar | 685 | 1794 | 611 | 34,0 |
| Tuzgle | 311 | 749 | 108 | 14,4 |
| Quevar | 136 | 352 | 59 | 16,8 |
| Total | 3969 | 19968 | 2477 | 12,4 |

Tabla 3.11: Valores de recarga calculados con actualización de modelo hidrológico y precipitación media estimada para subcuencas.

Para poder comparar los resultados de las Tabla 3.8 y la Tabla 3.10, los valores de caudales en la Tabla 3.8 se transpusieron por área de cada cuenca aportante, de tal forma de hacerlos equivalentes a los presentados en la Tabla 3.10. La Tabla 3.12 muestra la diferencia entre los caudales estimados con la versión anterior y la actualizada del modelo hidrológico. El aumento en los caudales se debe principalmente a la nueva interpretación del régimen hidrológico y a la recalibración del modelo.

| Cuenca | Q (EIA 2011-2015) (L/s) | Q Actualización (L/s) | Diferencia (L/s) |
|---|---|---|---|
| Rosario | 119 | 1193 | 1074 |
| Olaroz | 66 | 173 | 107 |
| Turi Lari | 61 | 144 | 83 |
| Archibarca | 40 | 87 | 47 |
| Guayaos | 35 | 102 | 67 |
| Tocomar | 62 | 611 | 549 |
| Tuzgle | 39 | 108 | 69 |
| Quevar | 12 | 59 | 47 |
| **Total** | **434** | **2477** | **2043** |

Tabla 3.12. Comparación de resultados EIA 2011-2015 y actualización de modelo hidrológico.

# 4. Caracterización hidrogeológica

Esta sección resume los principales resultados de estudios y pruebas de terreno para la caracterización de la geometría, estratigrafía y parámetros elásticos de las principales unidades hidrogeológicas de los sectores de Archibarca y del delta del río Rosario.

## 4.1 Estudios geofísicos

De acuerdo a los antecedentes consultados se han realizado varios estudios geofísicos para la caracterización de la zona del proyecto, los cuales se resumen a continuación.

### 4.1.1 Realizados por Exar

1. Perfiles sísmicos. Se realizaron 12 perfiles en el 2009 para EXAR. Éstos son interpretados por Bossi en 2011, en el informe de G.E. Bossi (p. 93), The Cauchari Salar Sedimentology, y son mencionados en el Informe de Impacto Ambiental de 2011.
   Para el presente análisis se consideran las interpretaciones de Bossi para las líneas sísmicas que quedan ubicadas en las zonas de interés para el abastecimiento de agua industrial, cercanas al sector de Archibarca.

2. Sondajes eléctricos verticales (SEV).

   Se han realizado un total de 126 SEV distribuidos de la siguiente forma:

   a. Cono de Archibarca: Se realizaron 33 SEV. La principal conclusión del estudio fue que existirían tres horizontes principales en el cono:

      i. Horizonte resistivo superior o Zona No Saturada.
      ii. Zona Saturada. Presente en toda la extensión del abanico. Zona con mejores características para la instalación de pozos para la extracción de agua de uso industrial delimitada por sondajes 06-07 y 16-17.
      iii. Horizonte Conductivo Inferior.

      Se menciona que mejores características se presentarían en la parte más cercana al ápice del cono, pero que se encuentra fuera de la propiedad minera.

   b. Márgenes del Salar: Se realizaron 93 SEVs distribuidos en 21 líneas geofísicas. Como principal conclusión del estudio se identificaron tres áreas adicionales a Archibarca con potencial para abastecimiento de agua industrial.

      i. Subcuenca del río Turu Lari Grande. Se recomienda sondaje de exploración de 200 m.
      ii. Extremo Suroriental del Salar de Olaroz. Se recomienda sondaje de exploración de 200 m.
      iii. Cono Aluvial del río Vilaspure. Se recomienda sondaje de exploración de 30 m.

3. Perfiles TEM

   Se trazaron 5 líneas con un largo total de 12,6 km en julio del 2010. Uno de los perfiles se ubicó a lo largo del ápice del abanico de Archibarca (TEM-5) en dirección perpendicular a la pendiente del terreno, y otro perfil (TEM-1) fue orientado de acuerdo al eje central del abanico y cubrió la parte distal de este. Análisis y discusión de estos estudios se presentan en el Feasibility Study NI 43-101 Technical Report de Lithium Americas (p. 9-8).

4. Perfiles gravimétricos

   Se realizaron 2 perfiles en una campaña de julio de 2010 con el objetivo de definir la profundidad de los sedimentos y evaluar la aplicabilidad de esta técnica para la caracterización del reservorio. La ubicación de los perfiles se muestra en la Figura 4.1. Análisis y discusión de estos estudios se presentan en el Feasibility Study NI 43-101 Technical Report de Lithium Americas (p. 9-6).

La Figura 4.1 muestra la ubicación de los estudios geofísicos realizados como parte del proyecto Exar: sondajes eléctricos verticales, perfiles TEM, líneas sísmicas y gravimetría.

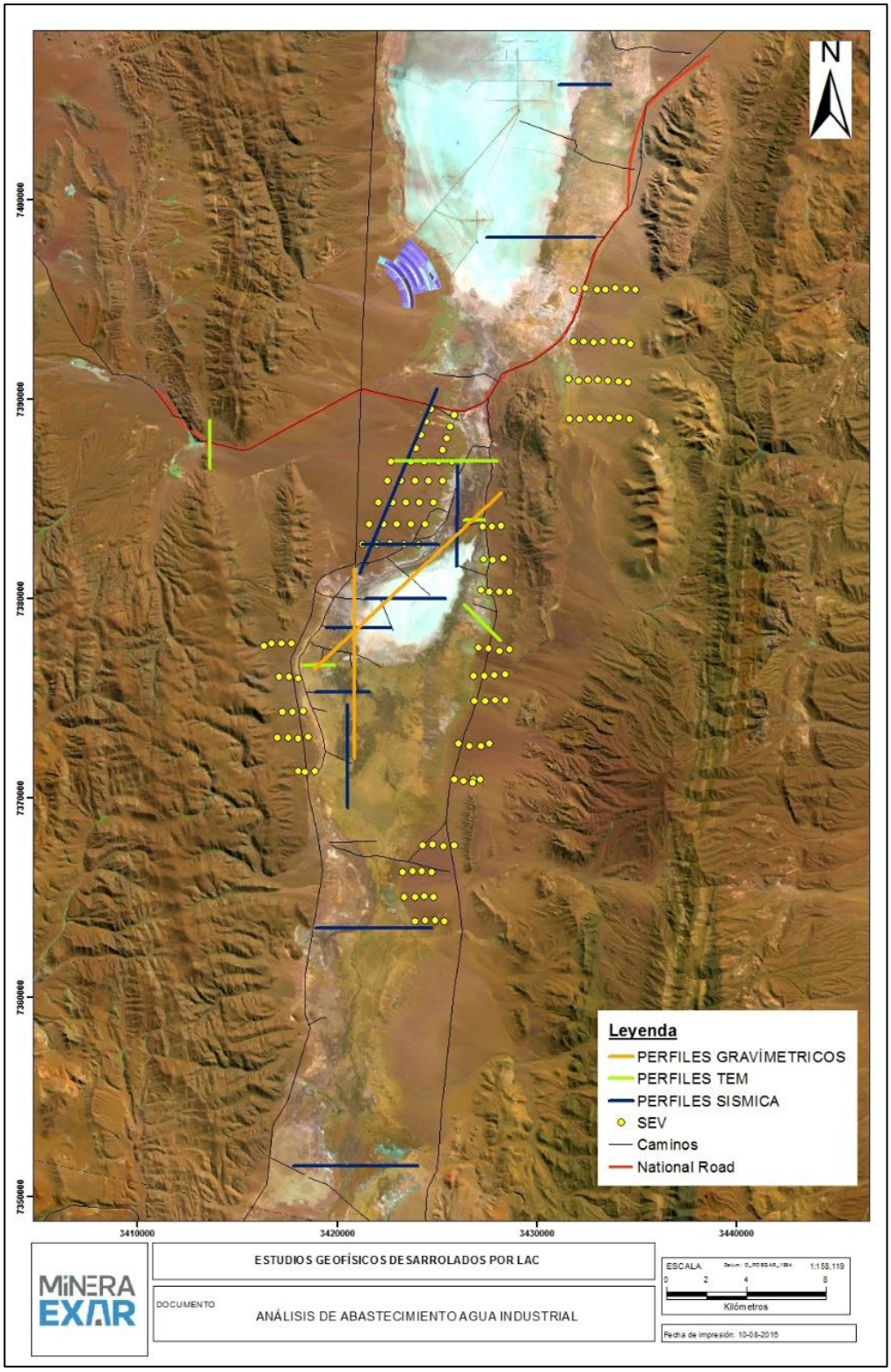



Figura 4.1: Ubicación de estudios geofísicos desarrollados por Exar.

En las conclusiones de los informes con la interpretación de los estudios geofísicos, se identificaron cuatro zonas con mayor potencial para la instalación de pozos de abastecimiento de agua industrial, las cuales se muestran en la Figura 4.2.

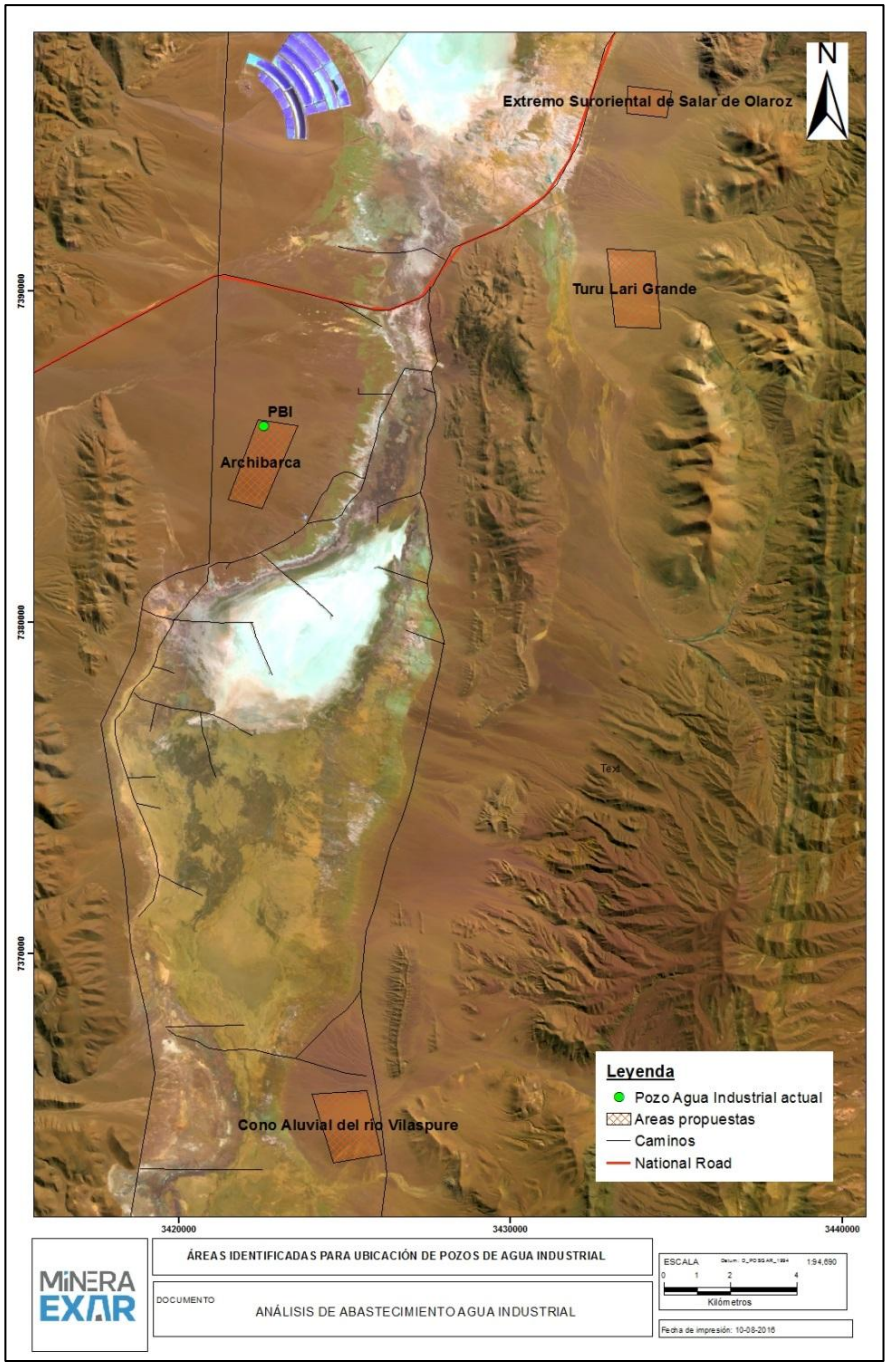



Figura 4.2: Áreas identificadas a través de estudios geofísicos para ubicación de pozos de abastecimiento de agua industrial. También se muestra ubicación de pozo PBI existente.

### 4.1.2 Estudios relacionados a proyecto Orocobre

En el Technical Report NI 43-101 de mayo de 2011 de ese proyecto se mencionan (p. 90) estudios geofísicos basados en gravimetría (130 estaciones). Además, se utilizó audio magnetotelúrica (AMT) en 136 estaciones. En esos estudios se definieron perfiles en distintas áreas del Salar de Olaroz, incluyendo el delta del río Rosario y el Cono de Archibarca. La ubicación de los perfiles de ambos estudios se muestra en la Figura 4.3. La interpretación de los resultados de esos estudios indica un espesor de los sedimentos del río Rosario de aproximadamente hasta 400 m.

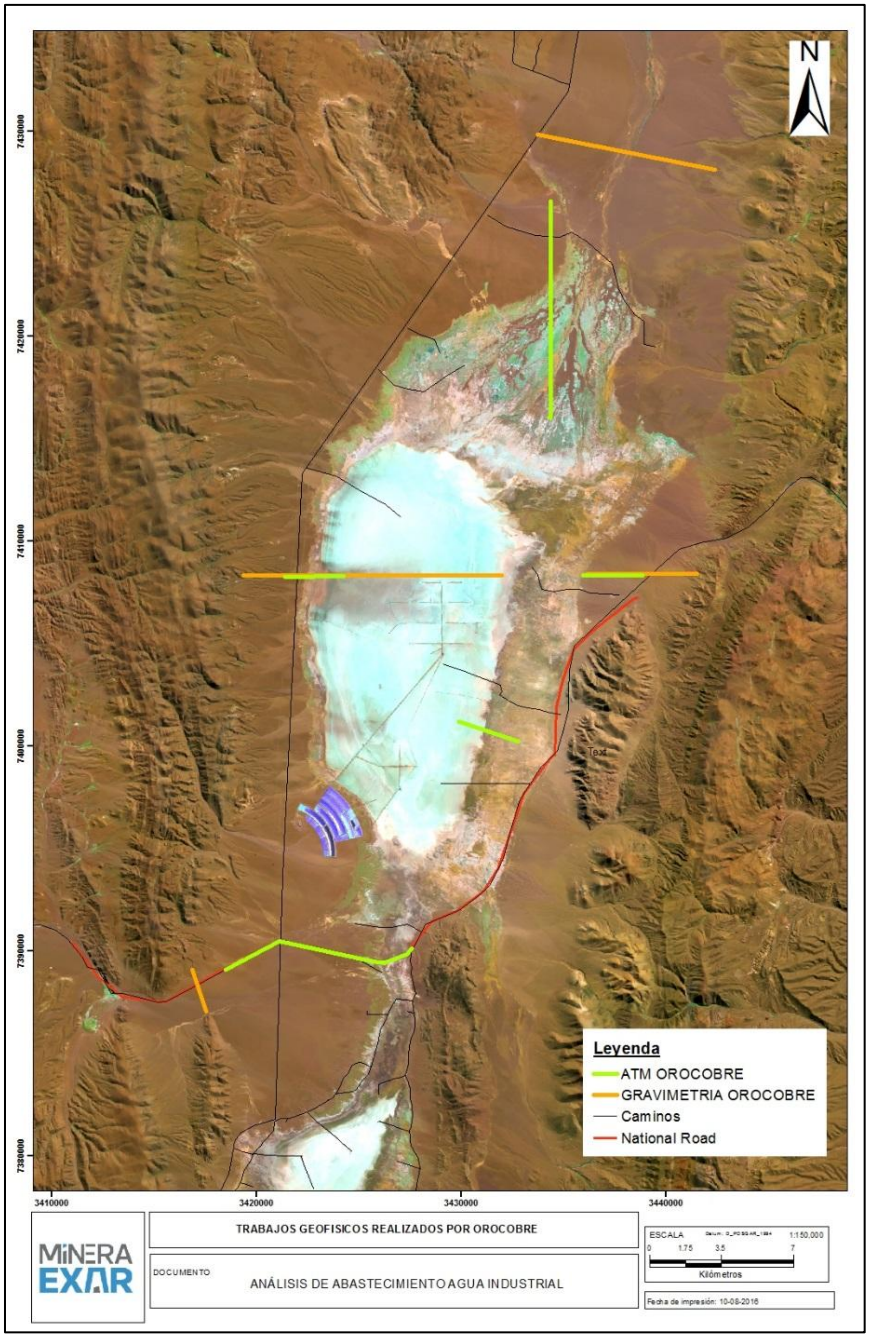



Figura 4.3: Ubicación de perfiles geofísicos realizados como parte del proyecto Orocobre.

## 4.2 Sondajes

### 4.2.1 Sector de Archibarca

En el sector del Cono de Archibarca se ubican varios sondajes con descripción estratigráfica. La mayoría de estos sondajes están ubicados en la zona más cercana al borde del salar, por lo que se cuenta con muy poca información estratigráfica de las zonas más cercanas al ápice. La Figura 4.4 indica la ubicación de dichos sondajes.

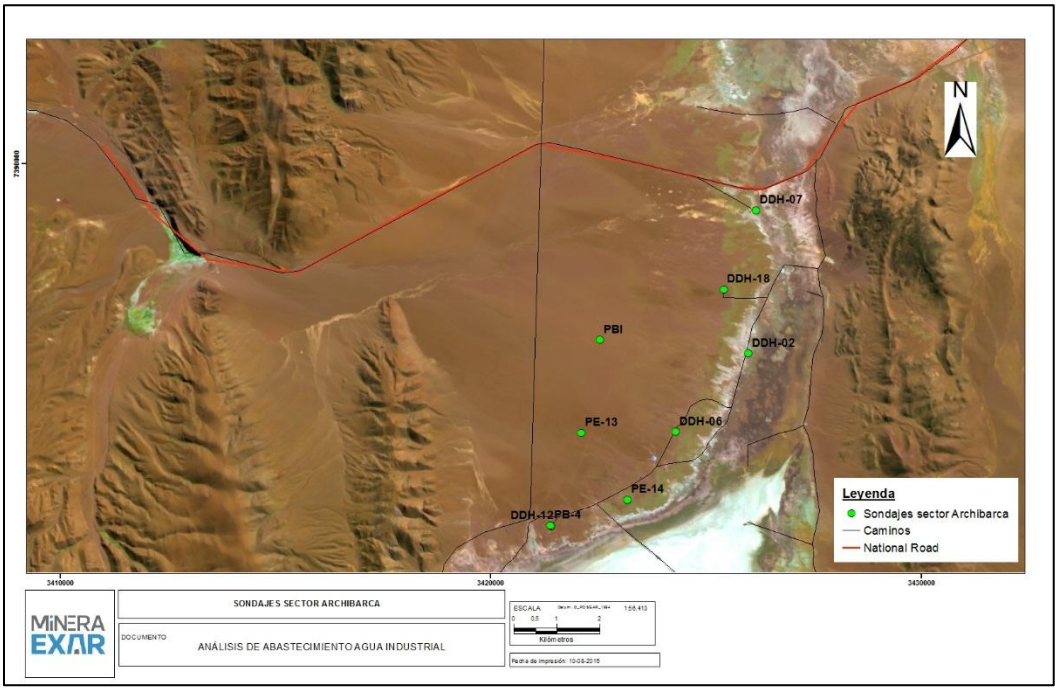



Figura 4.4: Sondajes ubicados en Cono de Archibarca.

En líneas generales, los sondajes muestran intercalaciones de estratos sedimentarios, como arenas, gravas o arcillas y, según su profundidad y ubicación, también aparecen estratos con sales. Dependiendo de la ubicación de los sondajes predominan las alternancias o son más homogéneos (ver Figura 4.5 y 4.6).

La estratigrafía de los puntos más cercanos al ápice, como el pozo PBI, está compuesta por gravas en su totalidad (50 m) con diferentes contenidos de finos pero en bajos porcentajes. El pozo más cercano al PBI, es el PE-13, donde el registro estratigráfico es escaso debido a problemas durante la perforación, aunque la interpretación del informe de la perforación señala que los primeros 50m están igualmente compuestos por gravas y arenas. No hay indicios de arcilla en los primeros 50 m de ambas perforaciones. Más cerca del borde del abanico el registro estratigráfico muestra una desaparición de las gravas y un aumento en el contenido de arcillas, en algunos casos como intercalaciones con arenas, aunque en otros se ve una clara presencia de capas con mayores potencias. La presencia de las arcillas se hace más notoria y somera en los puntos más al sur o más cercanos al borde del abanico, como son el caso de DDH-02 y de DDH-12, donde están

presentes desde los 0 o 4 metros de profundidad. En el sondaje DDH-06 esta capa confinante se ubica más profunda, a los 44 metros; mientras que en el sondaje DDH-18, aparece a los 26m. En líneas generales, los espesores mayores de las arcillas están entre los 6 y 10m para los primeros 50m de profundidad. (Ver Figura 4.5).

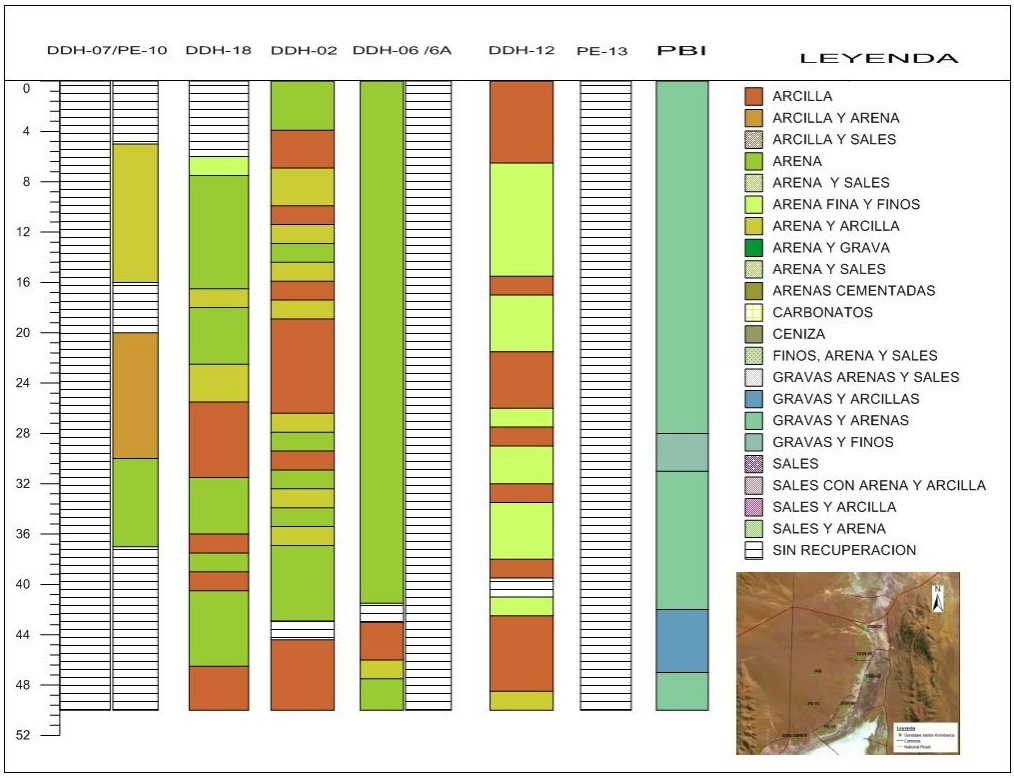



Figura 4.5: Detalle de los primeros 50m de sondajes ubicados en Cono de Archibarca.

Según muestra la Figura 4.6, a partir de los 50 metros la presencia de arcillas solo sigue siendo notoria en los sondajes DDH-18 y DDH-12, alcanzando hasta 40 m de potencia, pero su presencia se limita hasta los 170 m. A partir de esa profundidad puede haber alguna presencia, pero no es claramente distinguible a partir de la descripción estratigráfica.

La presencia de estratos con contenido de sales comienza en profundidades de los 120 a 140 m, excepto para el sondaje DDH-06 donde no se observa hasta los 200 m de profundidad.

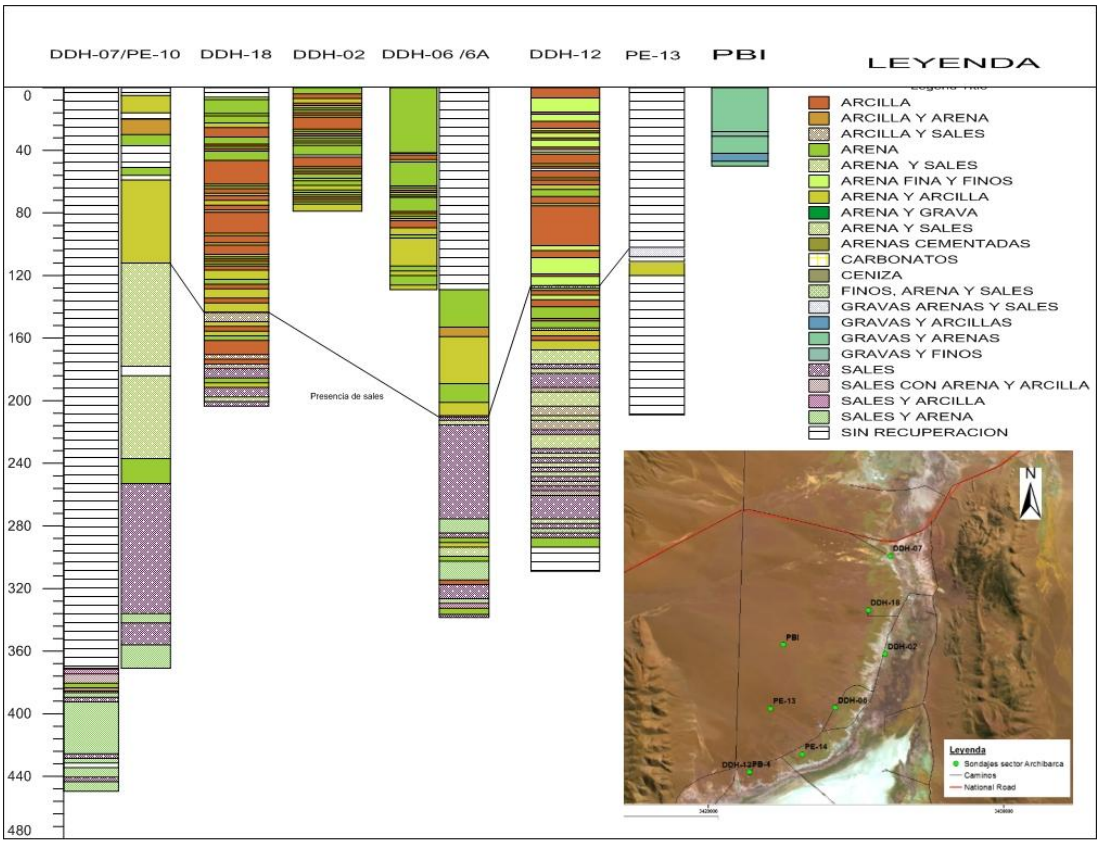



Figura 4.6: Descripción estratigráfica completa de sondajes ubicados en Cono de Archibarca.

### 4.2.2 Sector del río Rosario

Según los antecedentes consultados, la información disponible sobre sondajes es muy escasa en el sector del delta del río Rosario. Sin embargo, se encontró información estratigráfica a través del estudio de Prefactibildiad de Orocobre (NI-43-101 Technical report on The Salar Olaroz Lithium-Potash Project) de dos puntos ubicados en el delta o en cercanías del mismo, los cuales se muestran en la Figura 4.7.

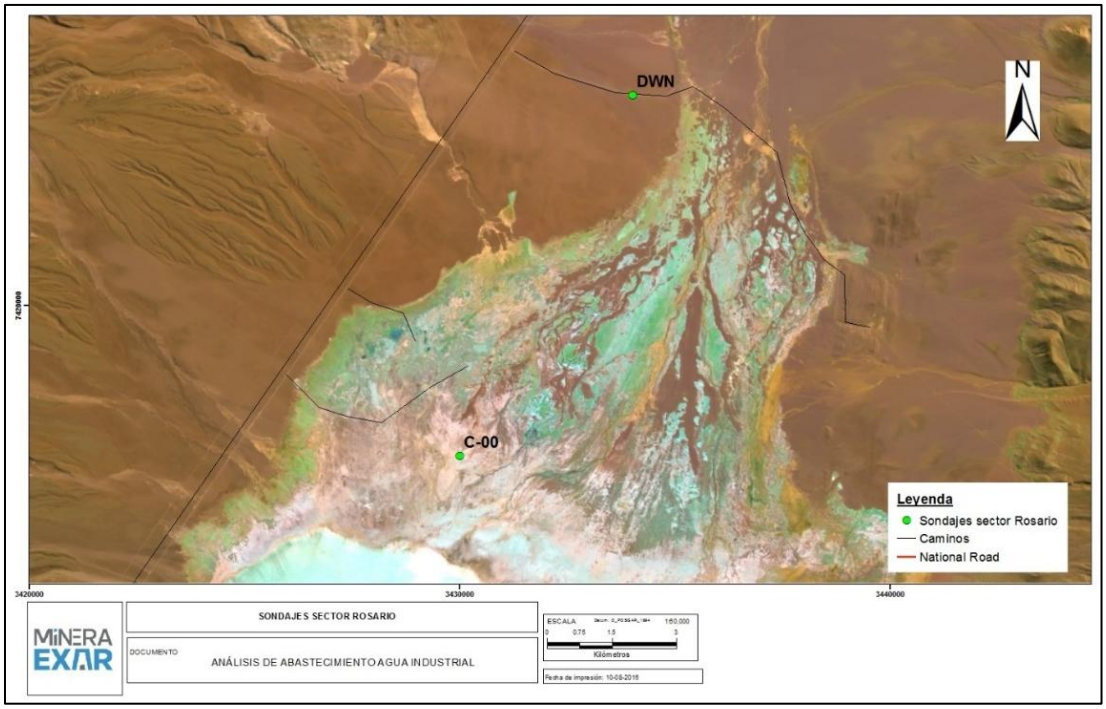



Figura 4.7: Ubicación de sondajes con información en el sector del río Rosario.

La información estratigráfica simplificada que se muestra en las Figuras 4.8 y 4.9, indica una alternancia de sedimentos que en el caso del sondaje DWN (200m), consiste en estratos de arenas con alternancia de estratos de gravas y arenas en todo su metraje, disminuyendo la cantidad de gravas en profundidad. En el caso del sondaje C-00 (50m), disminuye la cantidad de gravas y aumentan la cantidad de finos y arcillas, predominando las arenas. Los estratos arcillosos y areno arcillosos son de poca potencia, 0.5-1m, habiendo estratos de arena que alcanzan potencias de 6m. Hacia mayores profundidades disminuye el tamaño de grano de las arenas y aumenta la cantidad de finos.

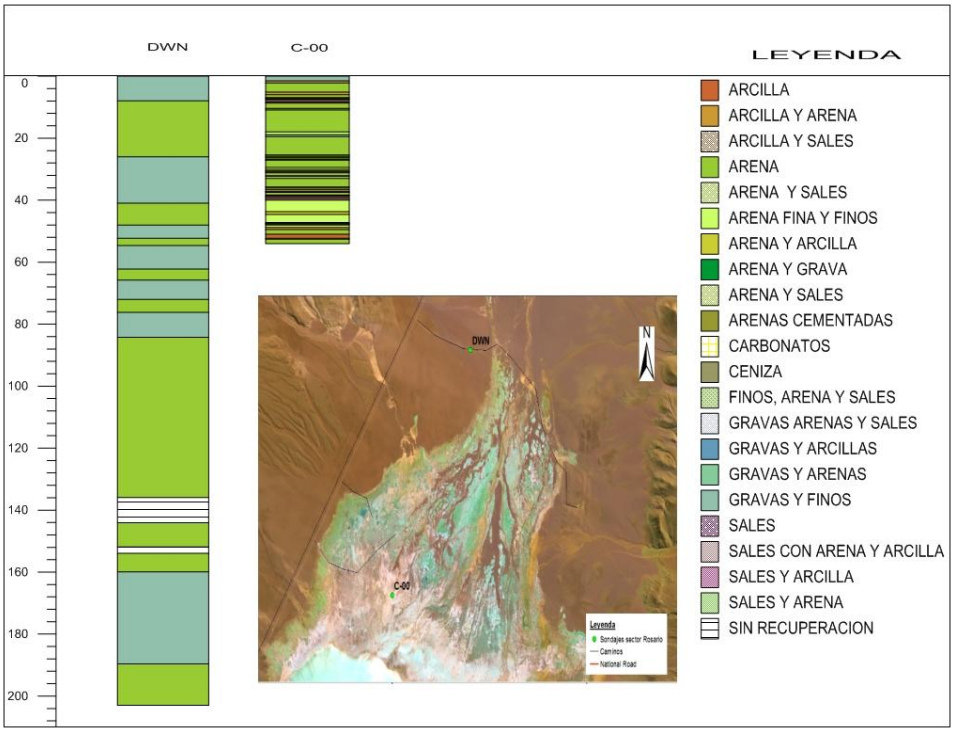



Figura 4.8: Descripción estratigráfica de sondajes completos ubicados en Cono de Rosario.

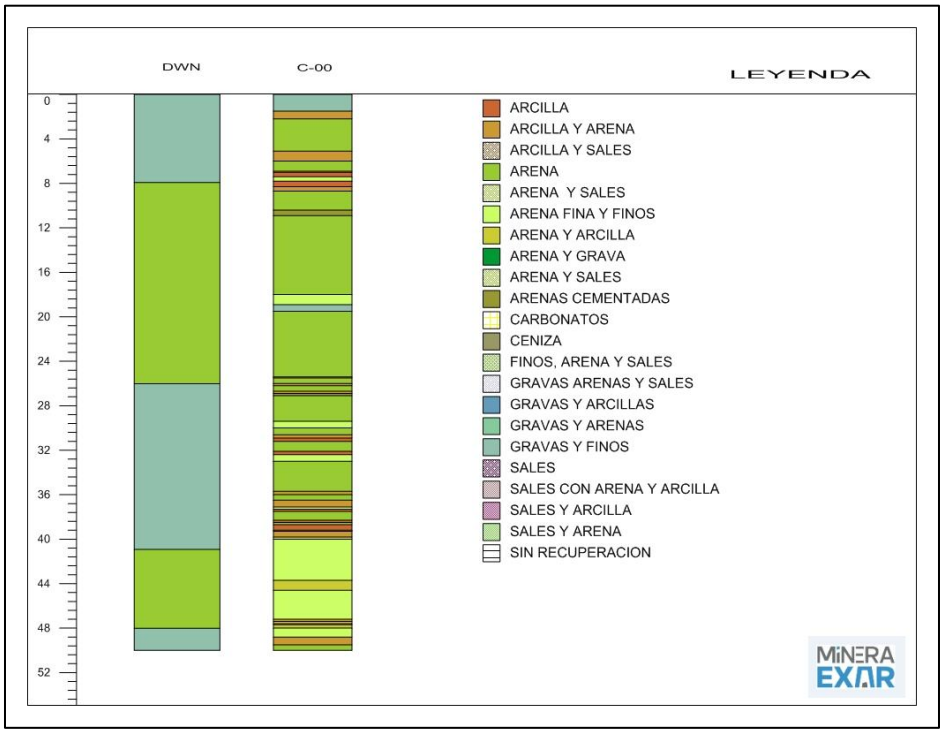



Figura 4.9: Descripción estratigráfica primeros 50 m.

## 4.3 Análisis de la información

Se correlacionó la información presentada en las secciones precedentes para caracterizar los sectores de principal interés para la prospección de agua para abastecimiento industrial.

### 4.3.1 Sector de Archibarca

A través de los perfiles geofísicos y los sondajes realizados en la zona del cono de Archibarca mostrados en la Figura 4.10, identificamos ubicaciones con mayor potencial para la prospección de agua industrial.

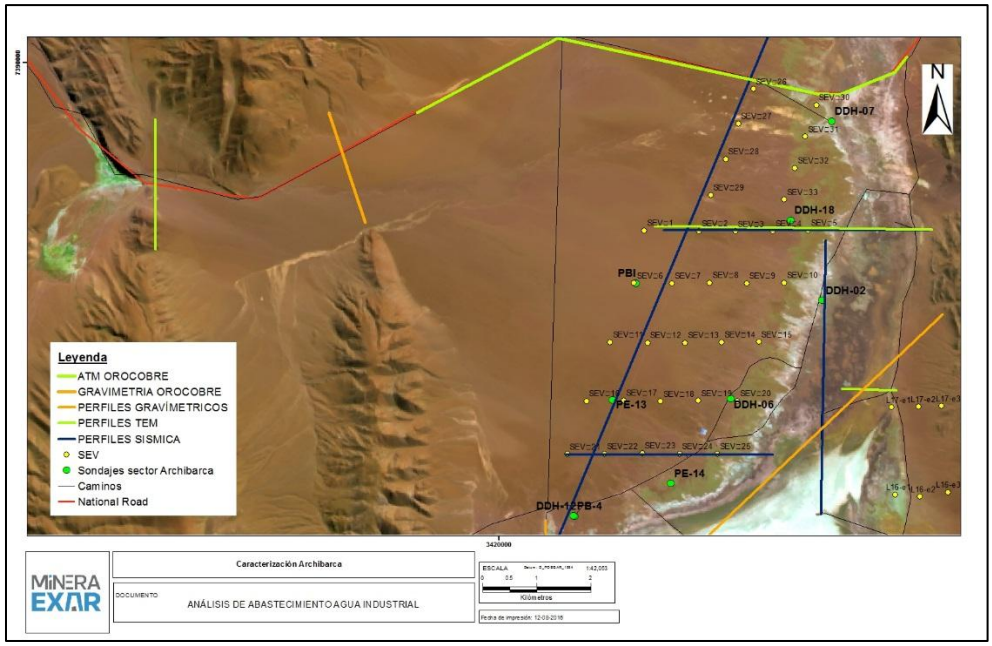



Figura 4.10: Información para caracterización Sector Archibarca.

De los perfiles N-S obtenidos de la interpretación de los sondajes eléctricos verticales, se concluye que hay un límite N-S a tener en cuenta en la ubicación de un pozo de agua industrial, ya que en la parte más distal del ápice de Archibarca aparece una cuarta unidad geoeléctrica, que se correlaciona con un estrato saturado en agua salobre. Esta capa se correlacionaría con la cuña salina que se extiende hasta el núcleo del salar. Además, en esa zona la potencia de la capa con interés prospectivo disminuye (Figura 4.11).

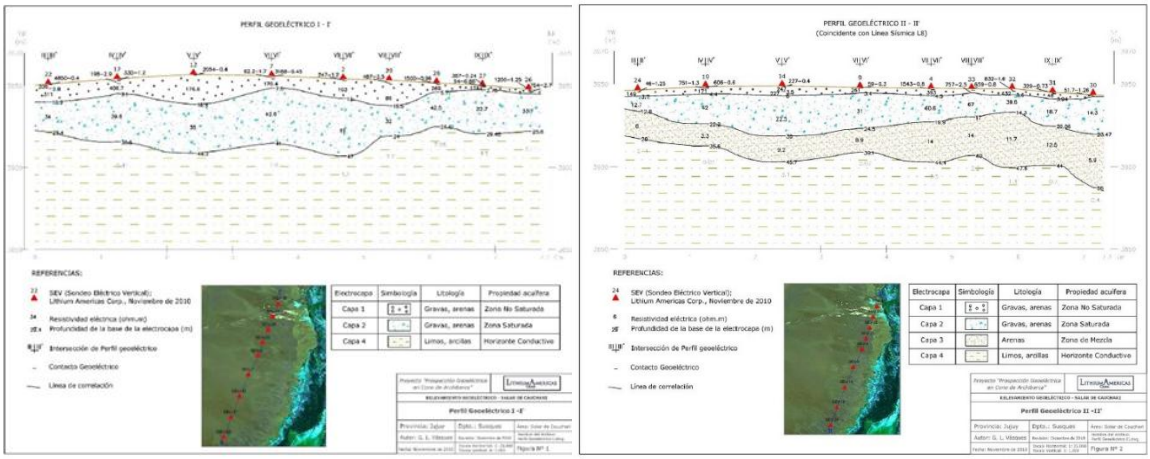


Figura 4.11. Evolución de las capas geoeléctricas según se avanza hacia el Este en el cono de Archibarca.

Revisando la estratigrafía en los sondajes más cercanos al perfil II-II´ (DDH-07, DDH-18, DDH-06) se corrobora que se correlacionan con arenas que pertenecerían a la misma unidad acuífera, sin verse, a priori, una separación entre el agua dulce/salobre por alguna capa confinante, lo que confirmaría la presencia de la cuña salina. Las unidades geo-eléctricas y sus espesores se correlacionan a grandes rasgos con la estratigrafía de los sondajes.

Revisando las interpretaciones de Bossi en las líneas sísmicas de interés, como son la Línea 8 que cruza el abanico en dirección N-S, los perfiles geoeléctricos anteriores, y la Línea 5 que lo cruza en dirección E-W (Figura 4.12), corroboramos algunas conclusiones. Se aprecia mayor espesor y presencia de arenas en la zona Oeste, disminuyendo hacia el Este, hasta desaparecer. Se aprecia la aparición de una capa confinante hacia el Este que va aumentando de espesor hacia el núcleo del salar, disminuyendo una vez en el núcleo. Existiría un estrato salino cuyo espesor es variable. Bossi indica que el ciclo superior (sedimentario) contiene unos 50 m de espesor, la unidad salina, unos 400 m, y el máximo espesor de la cuenca estaría alrededor de unos 600 m.

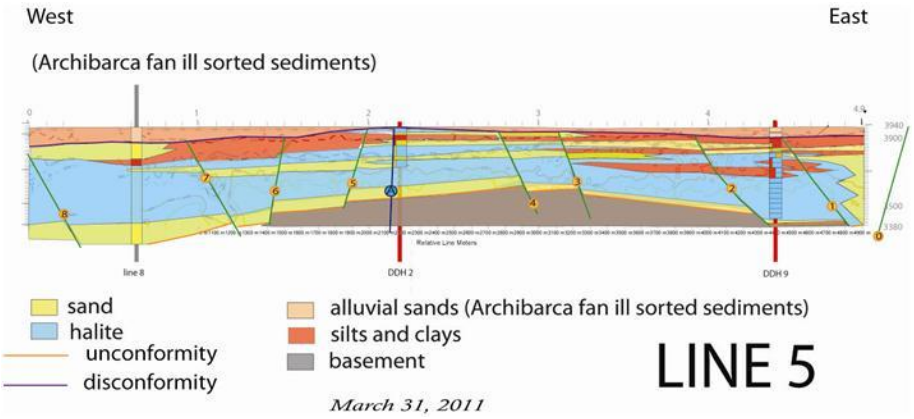



Figura 4.12: Interpretación de línea sísmica con orientación Este-Oeste. Fuente: G.E. Bossi, The Cauchari Salar Sedimentology.

Para ver la continuidad lateral de estos estratos, el perfil N-S (Línea 8) interpretado por Bossi, indica que la capa del ciclo superior (arenas y gravas) mantiene sus 50 metros aproximados de espesor para esta ubicación, observándose que por debajo de la misma se ubica una capa de sedimentos arcillosos que también posee continuidad lateral, excepto por donde pasa la Línea 5. Sin embargo, para corroborar esta interpretación sería necesaria más información de sondajes en esa zona.

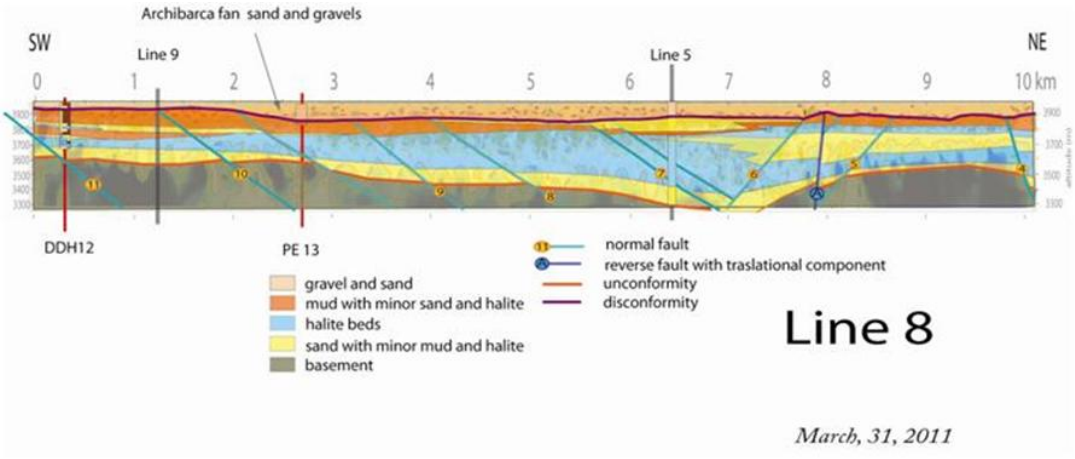



Figura 4.13: Interpretación de línea sísmica con orientación Sur-Norte. Fuente: G.E. Bossi, The Cauchari Salar Sedimentology.

Con esta información se puede concluir la diferenciación de tres unidades hidrogeológicas principales:

- Acuífero superior: Acuífero libre de agua dulce. Compuesto por gravas y arenas, donde las gravas van desapareciendo de W a E. En las zonas medias del abanico pueden alcanzar los 50 m de espesor, el cual va disminuyendo hasta los 15 metros en las zonas más marginales, llegando a desaparecer en algunos puntos. Esta capa contiene la zona no saturada y la zona saturada del acuífero libre de agua dulce que se presenta en el abanico de Archibarca. También es la capa que contiene la presencia de agua salobre al acercarse al margen del salar.

- Acuitardo: compuesto por arcillas. Con la información presente es difícil caracterizar la continuidad lateral de esta capa, ni la profundidad a la que aparece en algunos puntos. Según la información estratigráfica, se puede concluir que se hace más somera y de mayor espesor según nos acercamos al contacto del abanico con el borde del salar. Su espesor es variable, pero en las zonas donde hay registro estratigráfico puede llegar a poseer 50m, con algunas intercalaciones de arenas y limos.

- Acuífero inferior: acuífero salino confinado. Litológicamente compuesto por arenas en sus facies más someras, con intercalaciones de arcilla y sales masivas en profundidad. En las inmediaciones del abanico su presencia se hace más somera cuanto más nos acercamos al

contacto del abanico con el salar. En las áreas de interés prospectivo esta capa se encontraría a una profundidad de aproximadamente 120 m.

Se concluye de esta revisión, que para tener una mejor caracterización del área, desde el punto de vista de prospección de agua industrial, sería aconsejable la perforación de algunos sondajes diamantinos profundos cercanos al pozo PBI. Sin embargo, con la información presente, se concluye que las mejores ubicaciones para prospección de agua dulce son las más alejadas al borde del salar y en la zona más central del abanico. También es probable que el acuífero se extienda a mayores profundidades en la zona más cercana al ápice debido a la ausencia del estrato impermeable en esa zona, pero sería necesario realizar prospecciones para corroborarlo.

### 4.3.2 Sector del río Rosario

La información recabada en el sector del río Rosario, Figura 4.14, es más escasa que en el caso de Archibarca. Por lo tanto, para una buena caracterización de la zona serán necesarios algunos trabajos de geofísica y sondajes exploratorios adicionales.

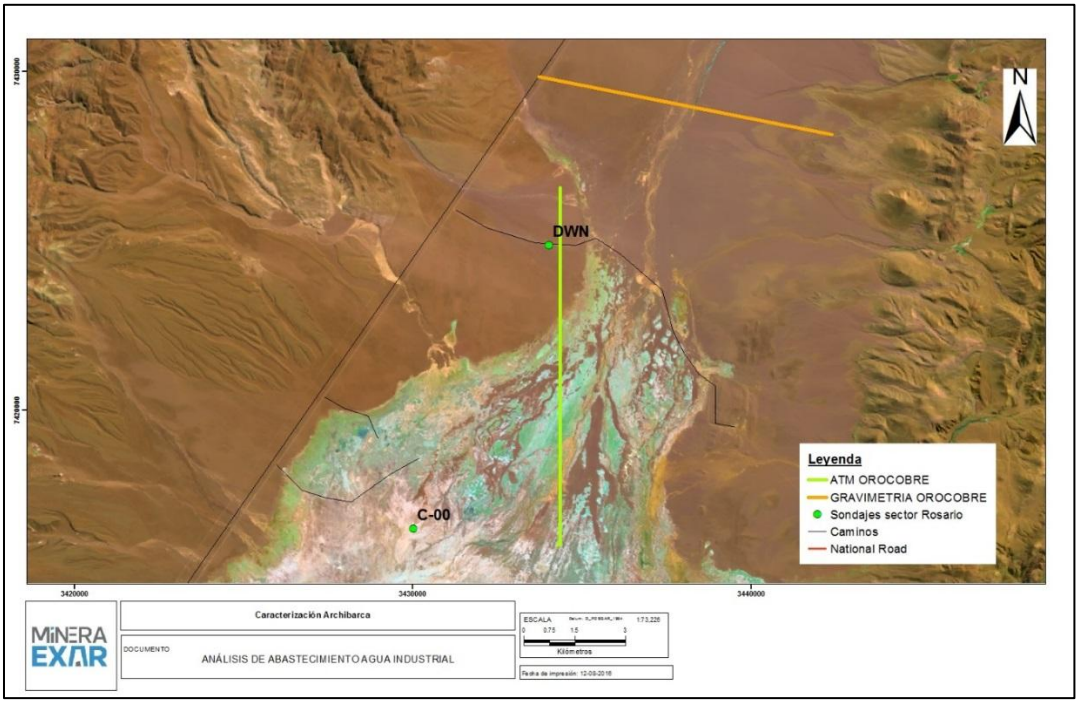



Figura 4.14: Información para caracterización Sector Rosario.

En base a la información existente, se puede concluir lo siguiente:

- Según el perfil gravimétrico del informe de Orocobre, Figura 4.15, existiría un espesor aproximado de 400 m de materiales asociados a la llanura de inundación con un ancho de 8 km. La información estratigráfica del pozo DWN, corrobora que en sus 200 m de profundidad se trata de una alternancia entre arenas y gravas y arenas finas, sin ninguna

capa confinante, tratándose de un acuífero libre poroso. En terreno se midió un nivel estático de 9 m en este punto.

- En el sondaje C-00 desaparecen la cantidad de gravas y predominan las arenas, con presencia de alternancia de capas arcillosas y arcillo-arenosa, lo que podría indicar que en las partes más distales del delta predominan los finos y desaparecen los materiales de grano grueso. A priori, esta área se trataría de un sistema multiacuífero cuyos acuitardos son de pequeño espesor y donde predominan las arenas. En este punto el nivel estático es más somero, estando en 2 m (Technical Report Orocobre NI 43-101, 2011).

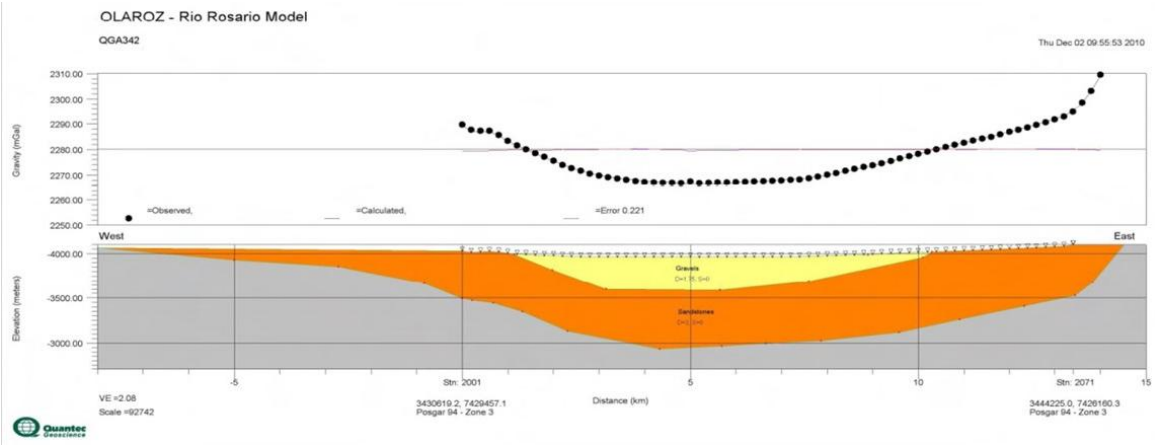



Figura 4.15: Perfil gravimétrico hecho por Orocobre. (Technical Report NI 43-101, 2011 (p. 91)

Según la correlación realizada por Orocobre con la información de sondajes en un perfil N-S desde el pozo DWN hasta el otro extremo del Salar de Olaroz, Figura 4.16, se diferencian varias unidades litológicas. En las inmediaciones y cercanías de los sondajes DWN y C-00 no habría indicios de unidades estratigráficas relacionadas con sales.

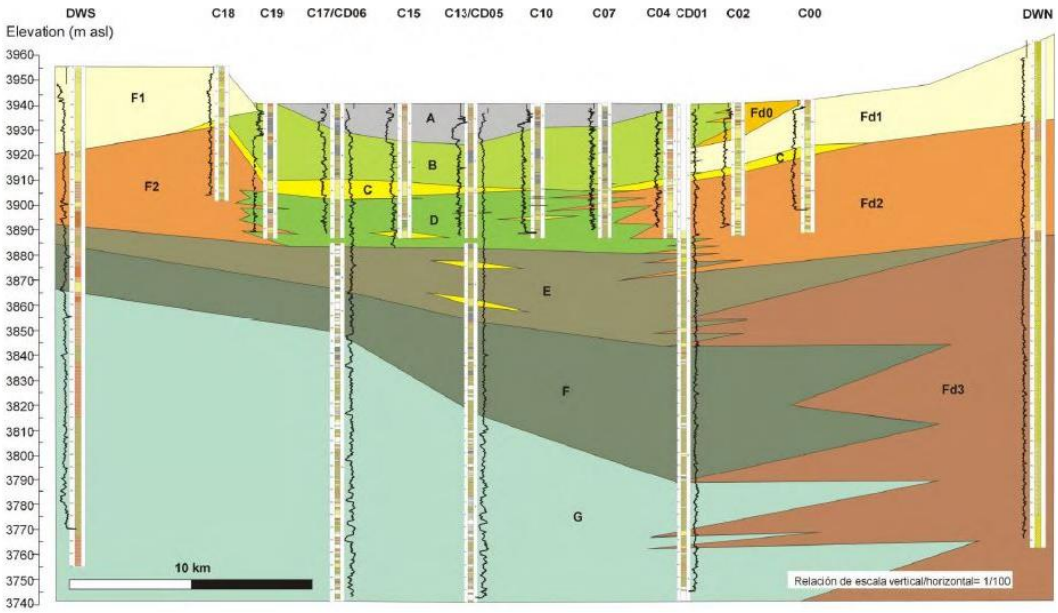



Figura 4.16. Sección N-S del Salar de Olaroz (Technical Report NI 43-101, 2011 (p. 50)). (Unidad C = arenas con carbonatos, Fd1 y Fd2, gravas y arenas grano grueso, y arenas finas y limos, respectivamente.)

Basado en los datos de pozos, junto con los perfiles geofísicos de ATM realizados por Orocobre, ellos estiman la posible forma del cuerpo de salmuera, indicando profundidades tentativas en que se podría encontrar el nivel estático de la misma, los cuales se muestran en la Figura 4.17.

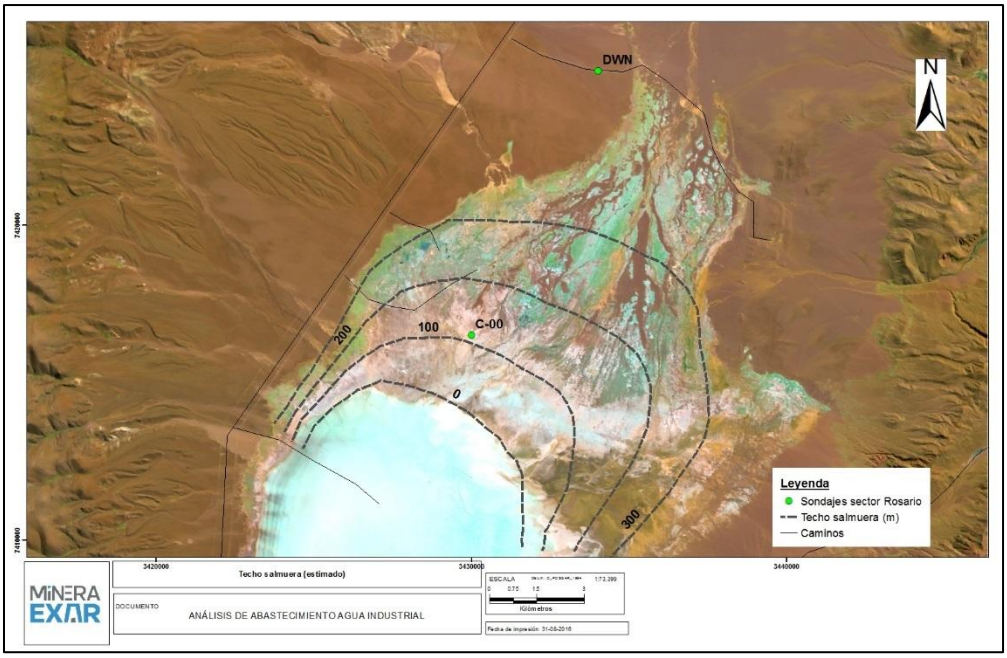



Figura 4.17: Cota superior estimada de la salmuera en el Salar de Olaroz, interpretado por Orocobre. Modificado de: Technical Report NI 43-101, 2011 (p. 50)

En resumen, la información recabada en Rosario permite estimar, en primera aproximación, el potencial del acuífero para la ubicación de pozos de abastecimiento de agua industrial. En base a la información recopilada en cuanto a litología, espesores del acuífero, amplitud de la cuenca y recarga al acuífero de la zona, no aparecen inconvenientes para la explotación del agua subterránea en este sector.

## 4.4 Pruebas de bombeo y ensayos hidráulicos

Se cuenta con información de los pozos de bombeo y observación PBI1 y PPI1 ubicados en el Cono de Archibarca. El pozo PPI1 se perforó en junio de 2011 hasta 53 metros de profundidad, y fue habilitado con una tubería de 4,5" de diámetro. Del análisis litológico y cronometraje de la perforación, se concluyó que los sedimentos aluviales del cono están compuestos por gravas gruesas, medianas y finas con matriz arenosa y escasas intercalaciones de arcilla roja. En la base del sondaje se identificó un estrato de arenas con presencia de sedimentos finos (limo y arcilla). En base a información de perfilajes geofísicos se identificó que la zona no saturada se extendía hasta los 18 m de profundidad. La zona de captura del pozo se extiende entre los 20 a 46 m de profundidad. Se realizó una prueba de agotamiento con un caudal máximo de 4,4 l/s, registrándose un descenso máximo de 0,45 m.

En base a los resultados obtenidos para el pozo PPI1, se decidió la construcción del pozo PBI1 que fue perforado hasta los 51,3 m. El sondaje final fue ensanchado hasta los 16" de diámetro. La habilitación del pozo se realizó con tubería de 12" y la zona de captura se extiende entre los 19 y 45 m de profundidad. Durante la perforación se identificó que los sedimentos corresponden a gravas de distinto diámetro (gruesas a finas) con matriz arenosa y escasas intercalaciones de arcilla roja.

Después de la habilitación, se realizó una prueba de agotamiento de cuatro escalones de 24 hrs. Para el caudal máximo de 22,6 l/s, se registró un descenso de 3,77 m. En base al ajuste de los descensos observados, se obtuvo una curva teórica para estimar descenso para distintos caudales. En base a esta curva se estimó que la extracción de un caudal de 28 l/s produciría un descenso en el pozo de 9,6 m.

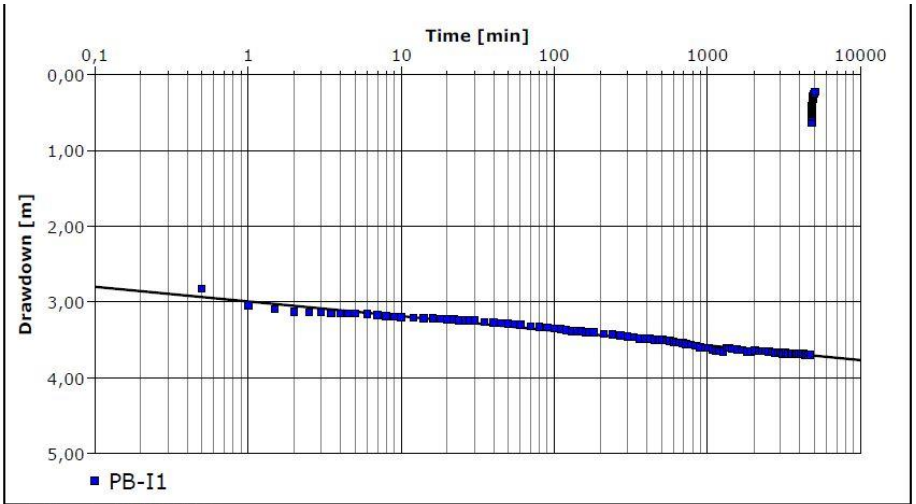
Adicionalmente, se realizó una prueba de gasto constante para determinar los parámetros elásticos del acuífero. En base a un análisis basado en el método de Neuman para acuíferos libres, se determinó un valor de transmisividad (T) de 1461 $m^2$/d (equivalente a un valor de conductividad hidráulica de 1461/26=56,2 m/d) y coeficiente de almacenamiento (S) de 0,038[1]. Valores de transmisividad calculados a partir de las pruebas de recuperación de ambos pozos

[1] El valor de almacenamiento calculado es bajo para un acuífero libre. Este valor se obtuvo al considerar el ajuste de los descensos para tiempos largos, lo cual es correcto para un acuífero libre. El ajuste que se obtuvo parece razonable, por lo que el bajo valor estimado puede deberse a otros factores tales como bajo caudal, etc.

fueron del mismo orden (1900 $m^2$/d), al valor obtenido del análisis de la prueba de gasto constante.

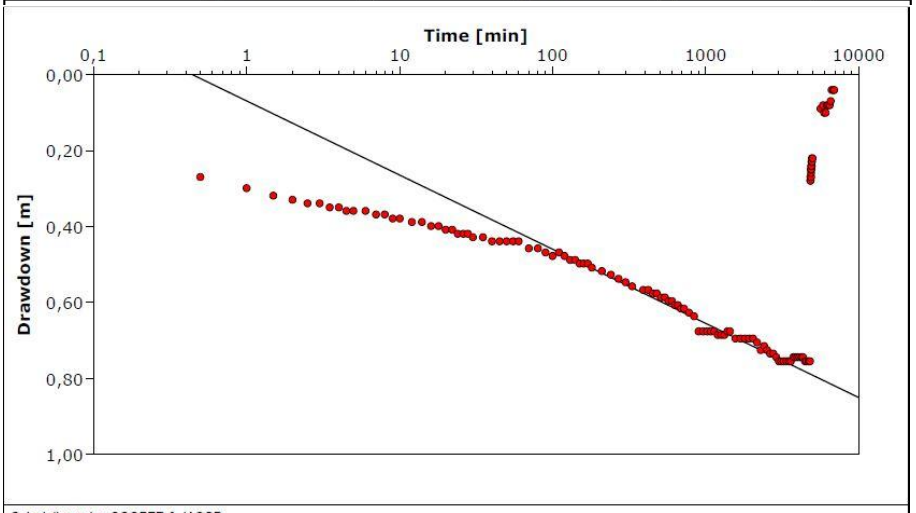
Con los datos originales disponibles de las planillas de terreno, se reinterpretaron la prueba de gasto constante realizada en el pozo PBI y los descensos medidos en el piezómetro PPI1. El valor de transmisividad obtenido a partir de la prueba de bombeo, tiene un valor de entre 1600 a 1800 $m^2$/d si se consideran los descensos medidos en el piezómetro, y de 1100 $m^2$/d con los descensos observados en el pozo de bombeo. El coeficiente de almacenamiento varía entre 0,005 y 0,01 según se analice por Cooper-Jacob o Theis. La recuperación arroja valores de T entre 1500 y 1100 $m^2$/d. Por tanto, el orden de magnitud de la transmisividad calculada a partir de la reinterpretación de los datos coincide con la interpretación anterior, y el valor de almacenamiento varía de orden de magnitud según el método de análisis.

Cabe hacer notar que los descensos provocados durante la prueba de bombeo fueron menores. Se desconoce la razón por la cual el ensayo no fue realizado con caudales mayores para producir descensos mayores, de tal forma de efectivamente probar las propiedades del acuífero ante escenarios de extracción más exigentes. Considerando lo anterior, podría ser conveniente repetir la prueba de bombeo provocando mayores descensos para verificar el comportamiento del acuífero en un escenario de mayor exigencia. De todas formas, con esta prueba de bombeo, se comprueba y se confirma que en este escenario de explotación (22 l/s) el acuífero responde con descensos menores, considerándose una tasa de extracción sostenible a largo plazo.




Calculation using COOPER & JACOB

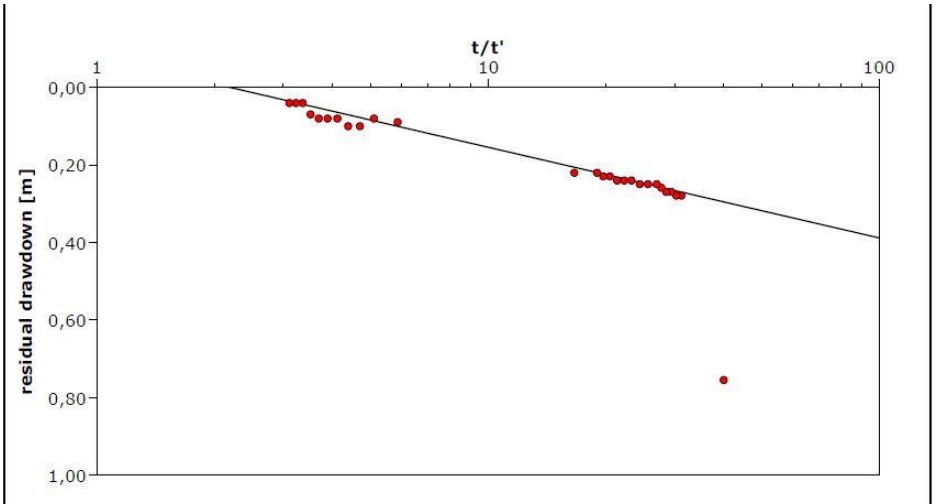
| Observation Well | Transmissivity [m²/d] | Hydraulic Conductivity [m/d] | Specific Yield | Radial Distance to PW [m] | |
|---|---|---|---|---|---|
| PB-I1 | $1{,}80 \times 10^{3}$ | $3{,}60 \times 10^{1}$ | $3{,}99 \times 10^{-14}$ | 0,15 | |



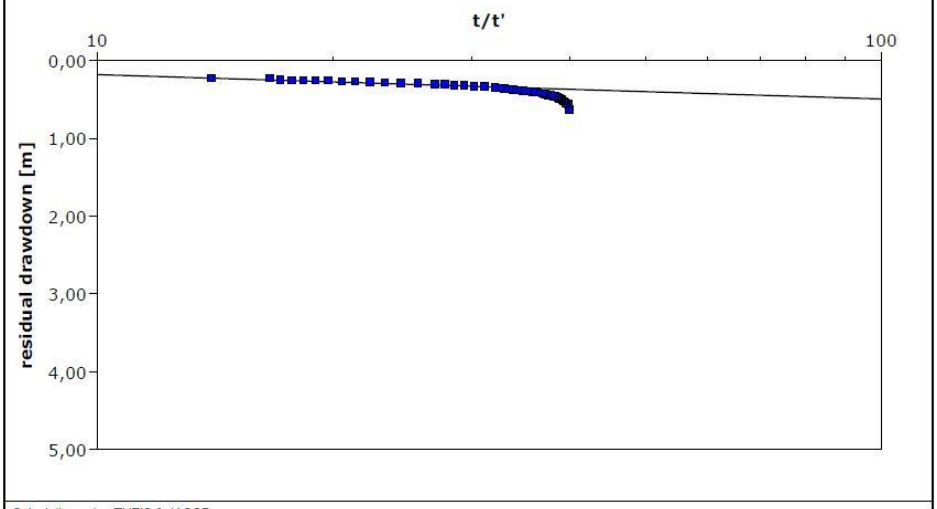

Calculation using COOPER & JACOB

| Observation Well | Transmissivity [m²/d] | Hydraulic Conductivity [m/d] | Storage coefficient | Radial Distance to PW [m] | |
|---|---|---|---|---|---|
| PP-I1 | $1{,}78 \times 10^{3}$ | $3{,}56 \times 10^{1}$ | $5{,}53 \times 10^{-3}$ | 15,0 | |

Figura 4.18: Análisis de curvas de agotamiento durante prueba de bombeo en PPI1 y PBI.




| Calculation using THEIS & JACOB | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Observation Well | Transmissivity [m²/d] | Hydraulic Conductivity [m/d] | Radial Distance to PW [m] | |
| PP-I1 | $1{,}49 \times 10^{3}$ | $2{,}97 \times 10^{1}$ | 15,0 | |




| Calculation using THEIS & JACOB | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Observation Well | Transmissivity [m²/d] | Hydraulic Conductivity [m/d] | Radial Distance to PW [m] | |
| PB-I1 | $1{,}11 \times 10^{3}$ | $2{,}22 \times 10^{1}$ | 0,15 | |

Figura 4.19: Análisis de curvas de recuperación en PPI1 y PBI.

## 4.5 Niveles piezométricos observados

Se cuenta con información de profundidad de niveles en pozos domiciliarios y sondajes realizados como parte del proyecto desde el año 2001. La Tabla 4.1 resume la información existente para todos los pozos domiciliarios y para sondajes ubicados en el Cono de Archibarca, los cuales se muestran en la Figura 4.20.

| Nombre Pozo | Año 2001 | 2010 | 2011 | 2012 | 2016 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CGW-01 | | 8 | 16 | 4 | 2 | 30 |
| CGW-02 | | 7 | 6 | | 1 | 14 |
| CGW-03 | 2 | 9 | 15 | 5 | 2 | 33 |
| CGW-04 | | 5 | 12 | 1 | 2 | 20 |
| CGW-05 | | 7 | 16 | 5 | 2 | 30 |
| CGW-06 | | 6 | 18 | 5 | 2 | 31 |
| CGW-07 | | 8 | 17 | 5 | | 30 |
| CGW-08 | | 8 | 18 | 4 | 2 | 32 |
| CGW-09 | | 7 | 17 | 5 | 2 | 31 |
| CGW-10 | | 7 | 18 | 5 | 2 | 32 |
| DDH-02 | | 33 | 198 | 5 | 3 | 239 |
| DDH-06 | | 45 | 1 | | 1 | 47 |
| DDH-06A | | | 5 | 15 | 3 | 23 |
| DDH-18 | | 7 | 16 | 3 | 3 | 29 |
| PB-4 | | | 48 | 16 | 3 | 67 |
| PBI | | | 70 | 39 | 3 | 112 |
| PE-10 | | 24 | 16 | 1 | 3 | 44 |
| PE-13 | | 18 | 176 | | 3 | 197 |
| PE-14 | | 37 | 223 | 15 | 3 | 278 |
| PP-4A (2") | | | 150 | 50 | 4 | 204 |
| PP-4A (4") | | | | | 4 | 4 |
| PP-4B | | | 86 | 15 | 1 | 102 |
| PPI | | | 123 | 21 | 3 | 147 |
| **Total** | **2** | **236** | **1265** | **219** | **54** | **1776** |

Tabla 4.1: Número de observaciones de niveles en pozos domiciliarios (CGW) y sondajes en el sector del Cono de Archibarca.

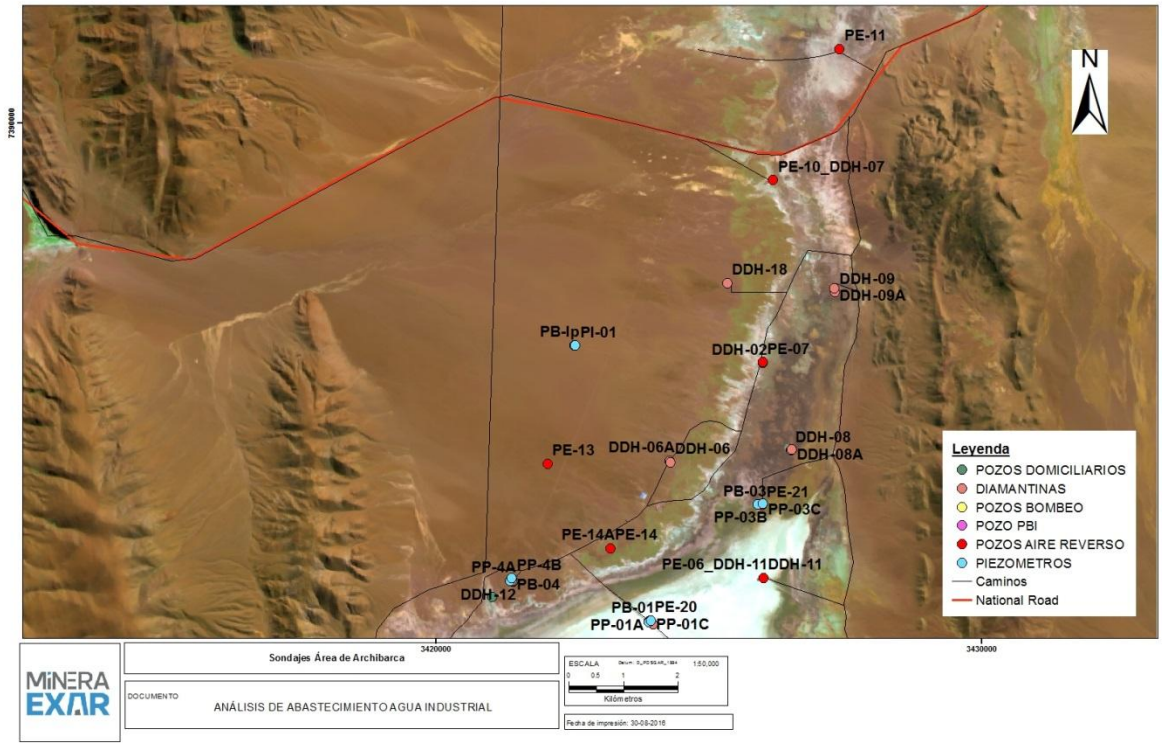



Figura 4.20: Ubicación de pozos y sondajes en el sector del Cono de Archibarca.

Los niveles en los pozos ubicados cerca del Cono de Archibarca muestran fluctuaciones menores a 3 metros, con excepción del sondaje PE-13 el cual presenta una diferencia entre la profundidad máxima y mínima de más de 22 metros (Tabla 4.2). Sin embargo, la Figura 4.21 muestra que con excepción de un par de observaciones realizadas durante el año 2011, que muestran fluctuaciones de más de 15 metros con respecto a los niveles medidos en fechas cercanas, los niveles del sondaje PE-13 se han mantenido estables desde fines del 2010. Esto podría indicar que, probablemente, las profundidades máximas medidas en ese sondaje se deban a factores no considerados en este análisis o a errores en la medición. Por otra parte, los niveles medidos durante el año 2010 muestran un paulatino incremento en la profundidad del nivel freático, con una variación acumulada de más de 5 metros. La tendencia de incremento de la profundidad observada en PE-13, no se observa de forma clara en los sondajes PE-14 (Figura 4.22) ubicado a menos de 2km de distancia, ni en DDH-06 ubicado a 2,3 km (Figura 4.20), lo que indicaría que los descensos son limitados al área cercana al sondaje PE-13.

| Pozo | CGW-01 | DDH-02 | PBI | PE-13 | PE-14 | PPI |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valor máx. | 2,3 | 3,7 | 20,9 | 31,0 | 3,3 | 18,1 |
| Valor mín. | 1,0 | 1,6 | 18,0 | 8,6 | 0,8 | 17,0 |

Tabla 4.2: Valores máximos y mínimos de profundidad medida en pozos ubicados en el Cono de Archibarca.

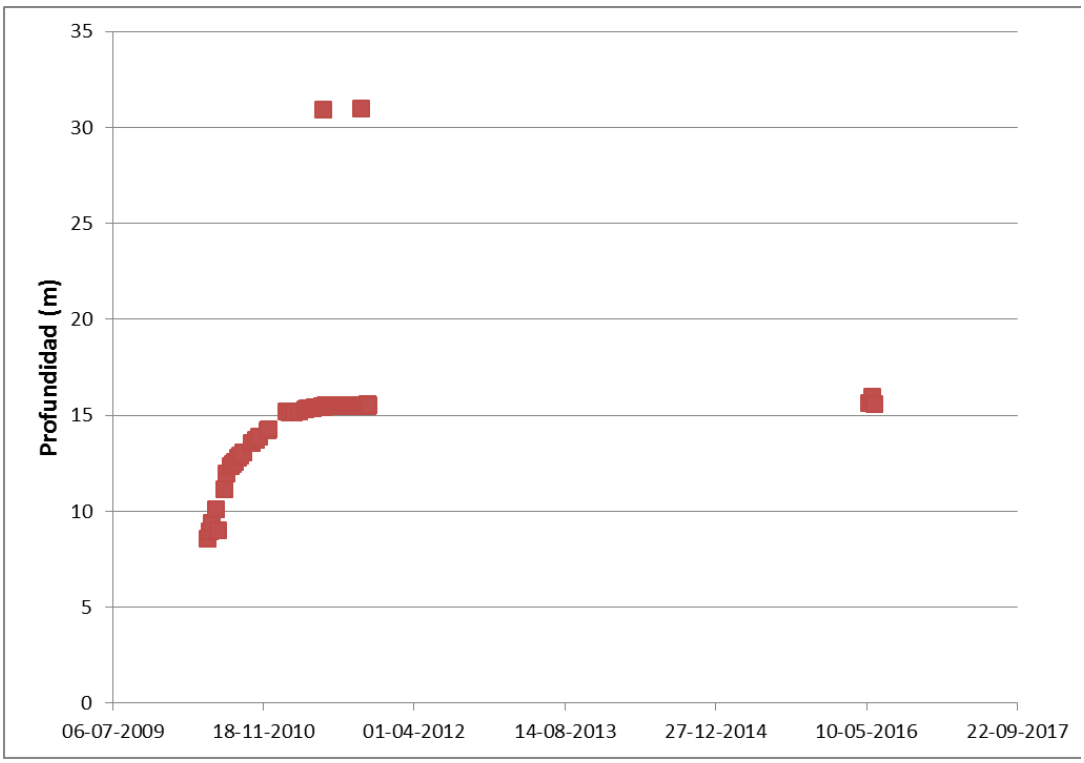



Figura 4.21: Niveles observados en pozo PE-13 ubicado en el Cono de Archibarca.

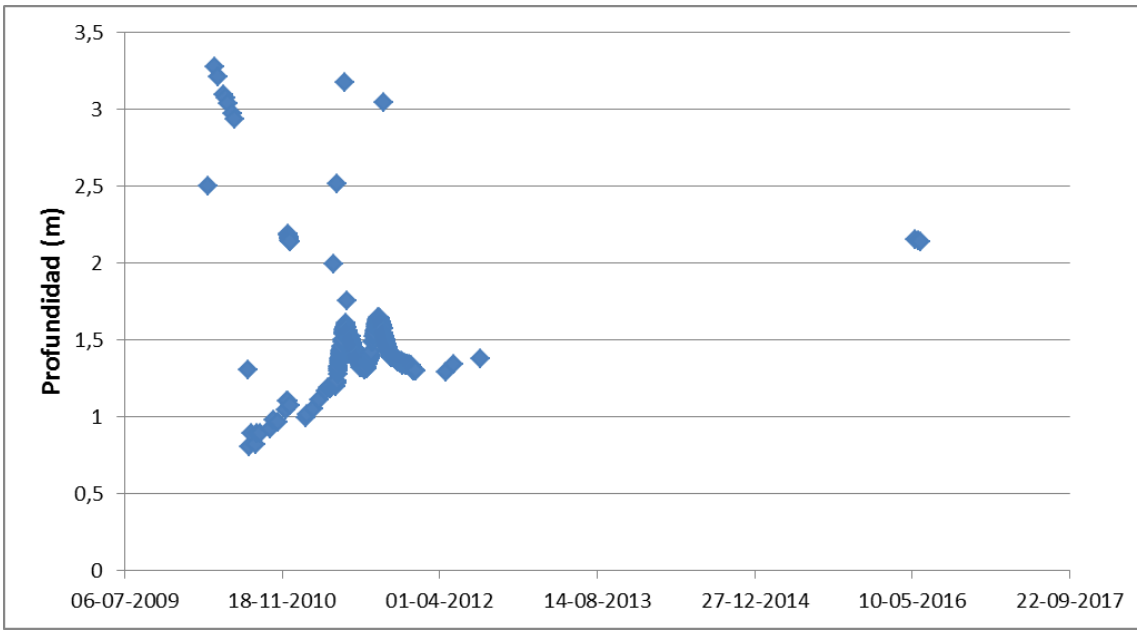



Figura 4.22: Niveles observados en pozo PE-14 ubicado en el sector distal del Cono de Archibarca.

# 5. Caracterización hidroquímica

## 5.1 Antecedentes

Como parte de los estudios de impacto ambiental que se han presentado a la autoridad se han realizado diversas campañas de monitoreo químico, tanto de muestras subterráneas como superficiales en los puntos mostrados en la Figura 5.1. Como se ve en la figura, en los sectores de Archibarca y Rosario ha sido mayor el número de puntos de tipo superficial que subterráneos muestreados. En el marco del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) presentado el año 2011, se hizo una caracterización de toda la cuenca a partir de un número considerable de muestras superficiales en el cauce del río Rosario, en la cuenca del río Tocomar y en las vegas de Archibarca, así como de muestras subterráneas asociadas a los pozos domiciliarios inventariados a esa fecha.

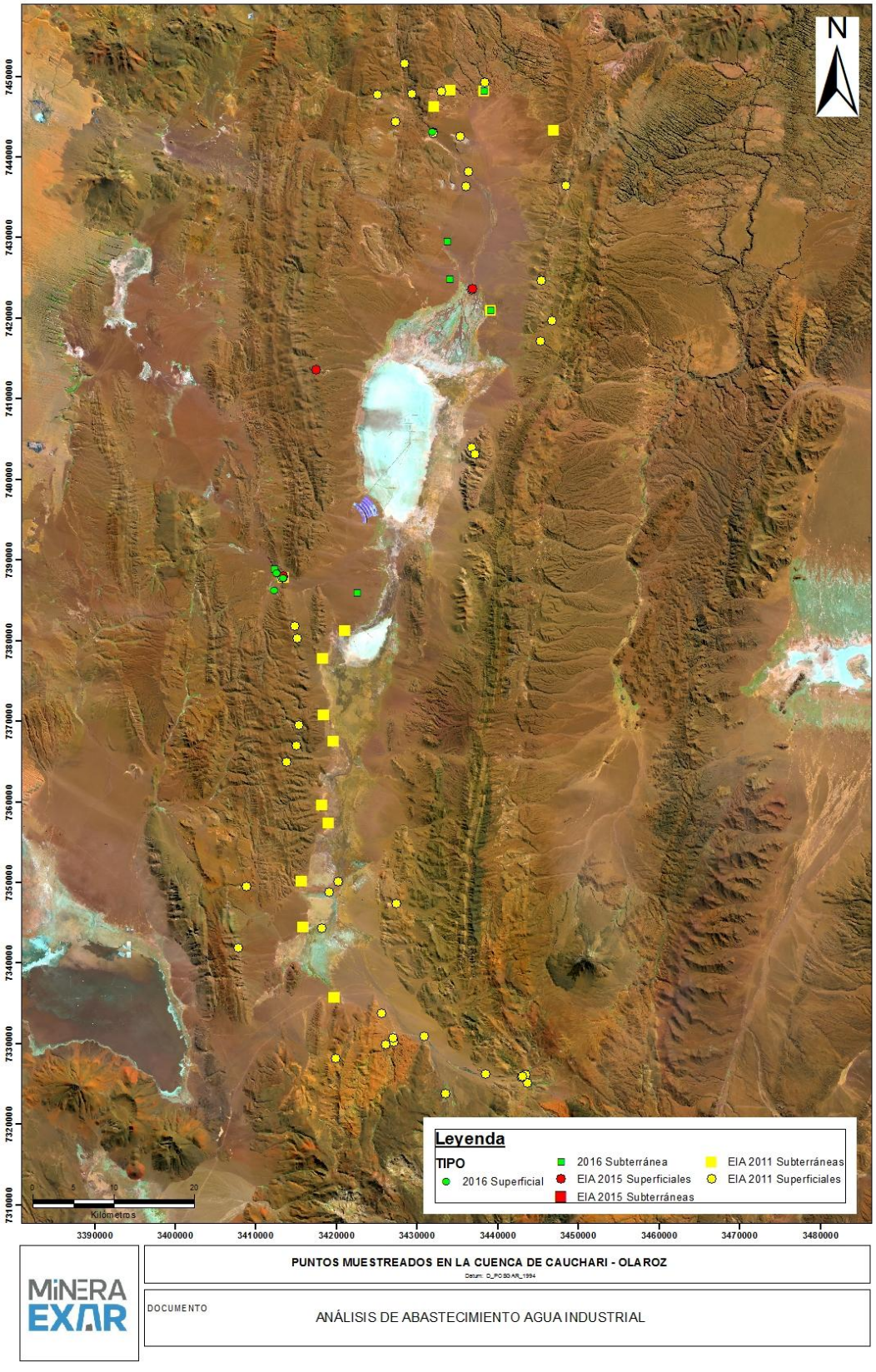



Figura 5.1: Ubicación de puntos de muestreo de agua superficial y subterránea.

Como parte del EIA presentado el año 2015, el muestreo se centró especialmente en los sectores de Rosario y Archibarca donde se tomaron un total de cinco muestras, de las cuales cuatro eran superficiales: una en Archibarca, una en el sector noroccidental de la cuenca y dos en el sector de Rosario; además de una muestra subterránea en el pozo de agua industrial (PBI) localizado en el sector del abanico de Archibarca.

Por otro lado, los resultados en ocasiones se encuentran por debajo de límites de detección bajos (<10 mg/l) que impide la caracterización con precisión de las muestras. Esto ocurre especialmente en el levantamiento de información para el EIA del año 2011, donde incluso la cantidad de iones analizados no permite la aplicación de los estándares expuestos en la Ley 24.585 sobre Salud, Seguridad y Medio Ambiente, para la definición de los usos del recurso en función de su composición química. De igual forma, las restricciones en cuanto a la definición de concentraciones y el número de iones analizados, limita los análisis en cuanto a la precisión de los tipos de agua y su evolución según los flujos del sector. Asimismo, en el EIA más reciente (2015) a pesar de que las técnicas analíticas aplicadas mejoraron notablemente, permitiendo cuantificar medianas y bajas concentraciones, y el número de iones aumentó, el hecho de centrar especial atención en el recurso superficial, condicionó las conclusiones en cuanto a la calidad del recurso se refiere en cada uno de los sectores considerados.

No obstante, los resultados de ambos estudios, aunque limitados espacialmente, daban indicios de que la calidad del recurso presentaba aparentemente condiciones regulares para su explotación aunque limitadas espacialmente, dado que no se seguía o no se intentaba definir la química del sistema subterráneo (acuífero) o cuenca que permitiera ver su evolución espacial de la química, o bien, su localización no era representativa de todo el sector considerado. Esto ocurrió especialmente en los sectores de Archibarca y Rosario, en donde a pesar de que se muestrearon puntos subterráneos y superficiales, no se pudo identificar el comportamiento de los sectores de acuerdo a la dinámica del flujo superficial y subterráneo inferido o aparente.

Bajo esta consideración y aprovechando las interpretaciones hidrogeológicas realizadas en estos estudios (EIA de 2011 y 2015), se decidió realizar una campaña de caracterización hidroquímica en los sectores de Archibarca y Rosario, dado que estos sectores se presentaban como posibles zonas de interés para su explotación. Esta campaña se realizó en el marco del proceso de reconocimiento y levantamiento de información en los sectores de Archibarca y Rosario, del 18 al 21 de julio de 2016, la cual se expone brevemente en el Capítulo 6 y en el Anexo 3 de este informe.

Para la caracterización correspondiente se han tomado y analizado 10 muestras de agua (5 subterráneas y 5 superficiales), las cuales fueron enviadas al laboratorio certificado ALS Antofagasta (Chile) para su análisis (Anexo 4).

El proceso de muestreo consistió en la toma de 1,5 litros de muestra mediante bailer, en el caso de muestras subterráneas, o directa en el caso de muestras superficiales (Figura 5.2). Previamente, se ambientaron todos los envases a utilizar; posteriormente durante el proceso de toma de muestras se midieron los parámetros físico-químicos tales como el pH, conductividad,

temperatura y densidad, así como las mediciones de nivel en el caso de las muestras subterráneas, o de caudal en el caso de las muestras superficiales. En la Tabla 5.1 se resume la información levantada en terreno.

Figura 5.2: Derecha: Elementos utilizados para el proceso de muestreo. Izquierda: Toma de muestra superficial en el sector de Archibarca.

| SECTOR | ID | PUNTO | TIPO DE MUESTRA | ALTURA (m s.n.m.) | MEDICIONES* | | pH | T (°C) | CE (mS/cm) | ρ (g/cm3) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | NIVEL (m) | CAUDAL (l/s) | | | | |
| ROSARIO | 1 | Pozo Domiciliario 2 | Subterráneo | 4051,26 | 0,44 | - | 6,27 | 3,8 | 0,864 | 1,00 |
| | 2 | OSW-01 | Superficial | 4042,74 | - | 296 | 8,74 | 9,2 | 4,04 | |
| | 3 | Sin Nombre | Subterráneo | 3970,35 | 5,57 | - | 8,67 | 14,1 | 1,656 | 1,002 |
| | 4 | DWN | Subterráneo | 3970,55 | 9,01 | - | 10,5 | 13 | 1,245 | 1,00 |
| | 5 | Pozo Domiciliario 1 | Subterráneo | 3961,56 | 0,14 | - | 7,44 | 4,3 | 0,621 | 1,00 |
| ARCHIBARCA | A | Puntera 1** | Superficial** | 4077,677 | 0,94** | - | 8,39 | 3,9 | 4,01 | 1,05 |
| | B | Punto B | Superficial | 4080,724 | - | 0,11 | 7,44 | 6,2 | 2,59 | |
| | C | Punto C | Superficial | 4092,81 | - | 0,09 | 8,78 | 6,4 | 4,53 | |
| | D | Punto D | Superficial | 4069,998 | - | 37,5 | 7,83 | 2,6 | 2,07 | 1,005 |
| | E | PBI | Subterráneo | 3962,3 | 18,07 | - | 7,39 | 14,2 | 1,595 | |

Tabla 5.1: Puntos muestreados durante la visita a terreno de julio de 2016. *Realizadas entre el 19-21 de julio de 2016. ** Aunque se habilitó una puntera, la muestra fue tomada en la charca asociada a dicha puntera (ver Figura 3.40 foto izquierda).

En las Figuras 5.3 a 5.6 se muestra la distribución de la Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos (mg/l), pH y Temperatura de las muestras tomadas y analizadas en los sectores de Archibarca y Rosario.

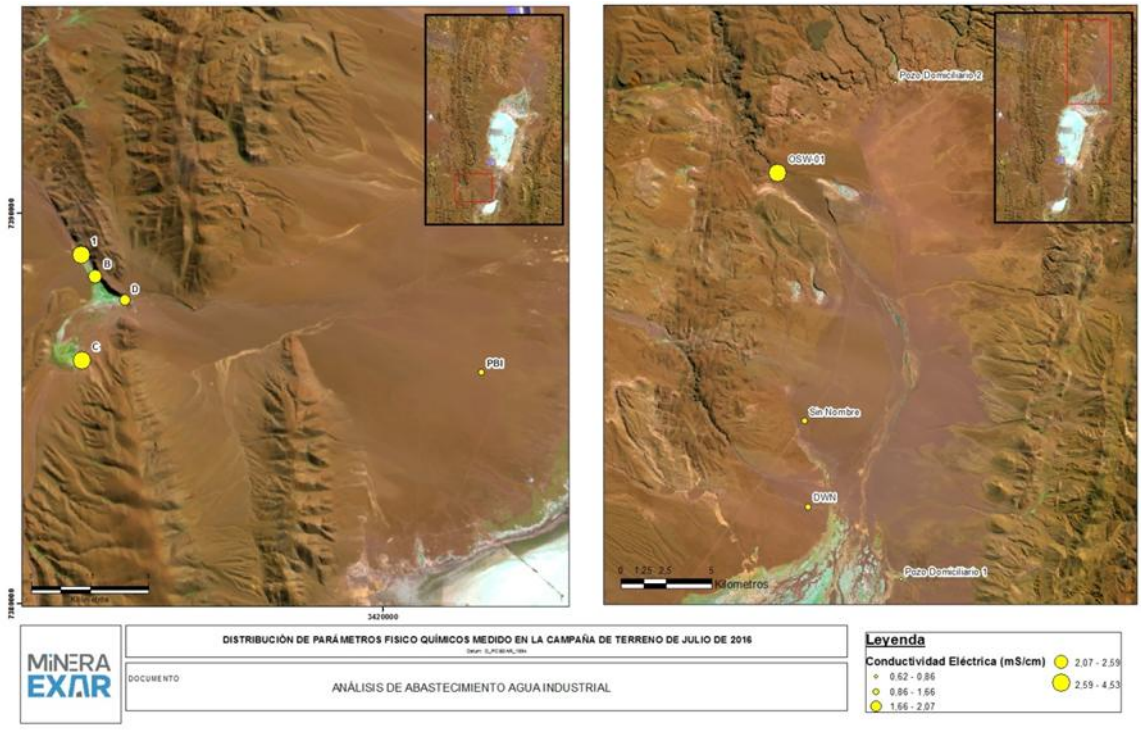



Figura 5.3: Distribución de la Conductividad Eléctrica (mS/cm) en el sector de Archibarca (izquierda) y Rosario (derecha).

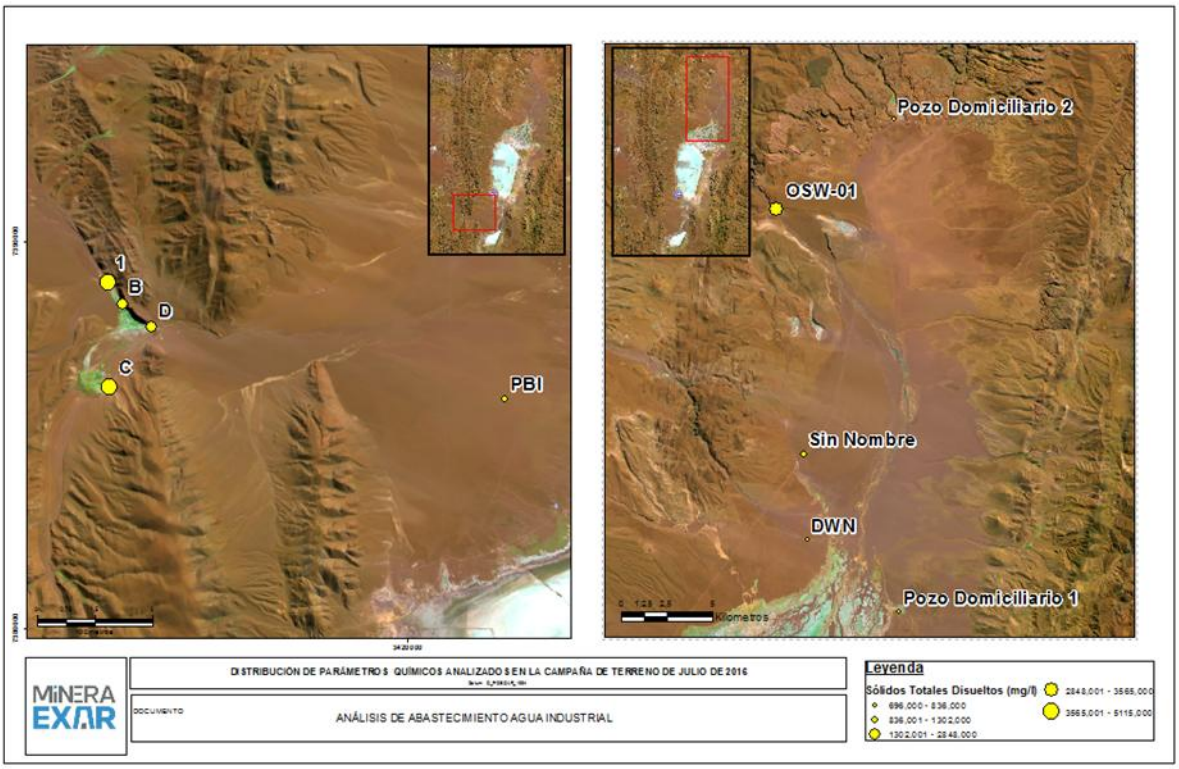



Figura 5.4: Distribución de la Sólidos Totales Disueltos (mg/l) en el sector de Archibarca (izquierda) y Rosario (derecha).

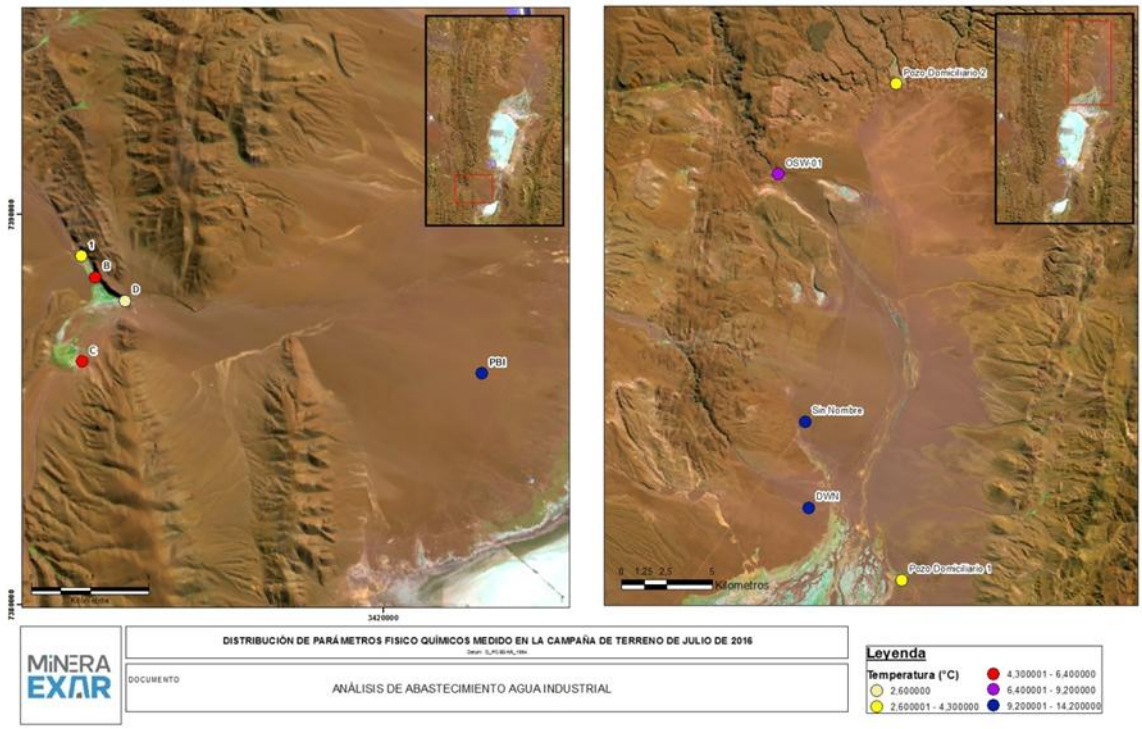



Figura 5.5: Distribución de la Temperatura (°C) en el sector de Archibarca (izquierda) y Rosario (derecha).

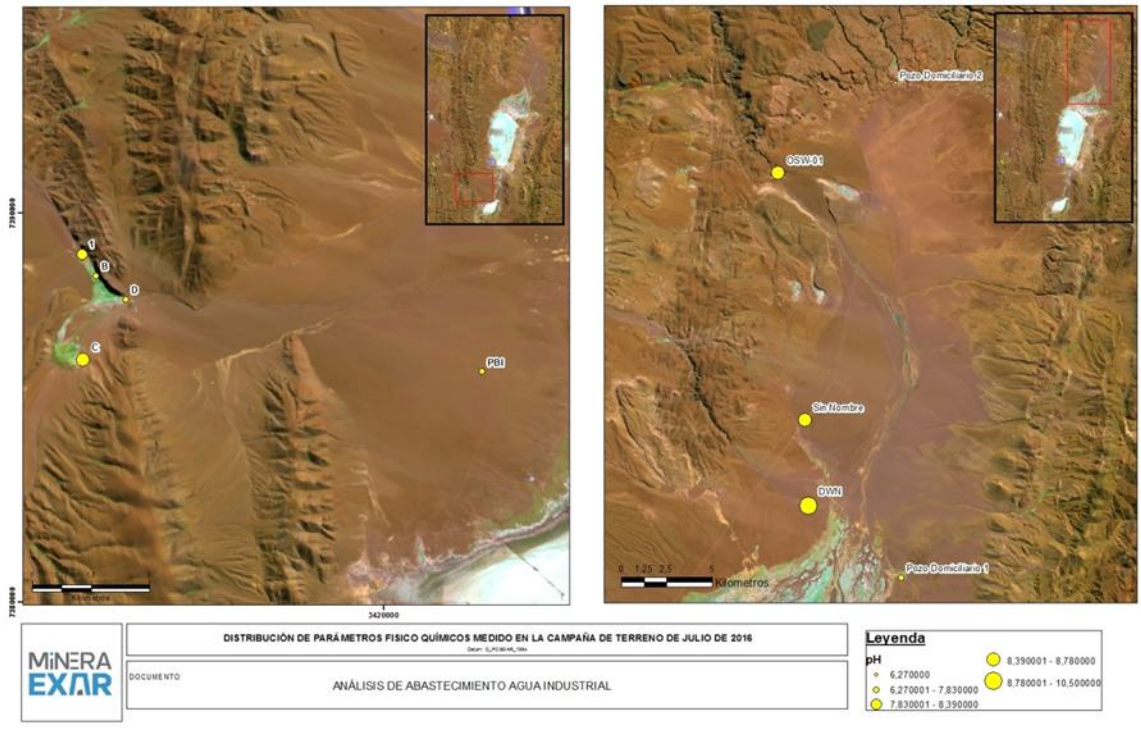



Figura 5.6: Distribución del pH en el sector de Archibarca (izquierda) y Rosario (derecha).

Como se aprecia en las figuras anteriores, en el caso de la conductividad los valores oscilan entre 4,5 mS/cm y 0,62 mS/cm. En el caso de Archibarca los valores más altos están asociados a las vertientes que alimentan el sector de las vegas de Archibarca, decreciendo dicho valor a medida que el flujo avanza hacia el abanico de Archibarca, incluso, en el pozo de agua industrial localizado sobre el abanico, se miden valores más bajos de conductividad que los medidos aguas arriba del mismo en el sector de las vegas. Para el sector de Rosario se puede apreciar un comportamiento casi similar al de Archibarca: los valores más altos corresponden al río Rosario aforado en OSW-01, decreciendo los valores una vez se avanza hacia el salar. No obstante, esto no ocurre con el pozo domiciliario 2 ubicado aguas arriba del punto OSW-01. Un comportamiento similar se aprecia para los Sólidos Totales Disueltos, siendo mayores (significativamente) en las fuentes superficiales que en las subterráneas.

En el caso del pH el comportamiento es particular en cada uno de los sectores: En Archibarca se aprecia un comportamiento similar al observado para la conductividad eléctrica, en donde los valores más básicos corresponden a las vertientes que alimentan las vegas, neutralizando a medida que se avanza hacia el sector del abanico de Archibarca, incluso en el pozo de agua industrial PBI lo valores son más próximos a 7 en comparación con las muestras analizadas aguas arriba. En el caso de Rosario, el comportamiento no es tan claro: por un lado el pozo domiciliario 2 presenta un pH más ácido, mientras que la gran mayoría de los puntos presentan pH muy básicos, salvo el pozo domiciliario 1 cuyo pH es más próximo a 7.

En el caso de la temperatura, se aprecia que las muestras superficiales tienen influencia de las condiciones atmosféricas, mientras que las muestras subterráneas demuestran valores promedio similares a los que usualmente se definen para las aguas subterráneas.

Los resultados de laboratorio (Anexo 4) de las muestras analizadas fueron sometidos previamente a un balance iónico para determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos (Figura 5.7). Los valores del balance en promedio oscilan en un 4%, y son generalmente mayores a cero salvo en el pozo DWN.

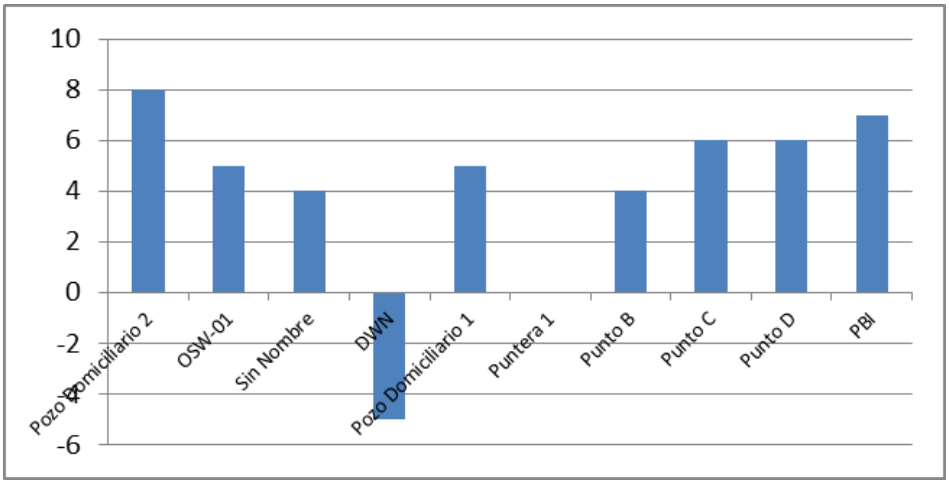



Figura 5.7: Resultados del balance iónico aplicado a las muestras de agua analizadas.

Analizando los iones mayoritarios se aprecia que las aguas tanto del sector de Archibarca como de Rosario corresponden a aguas del tipo cloruradas sódicas y potásica o sulfatadas sódicas, siendo el total de muestras del sector de Rosario más cloruradas que en Archibarca en donde no existe dominancias de aniones, salvo por el punto C que muestra dominancia del cloruro en su composición. Asimismo, ambos conjuntos de muestras presentan dominancia del Na y K con bajas proporciones de Ca y Mg salvo por el pozo domiciliario 1 que presenta mayores proporciones de Ca en comparación con las otras muestras (Figura 5.8).

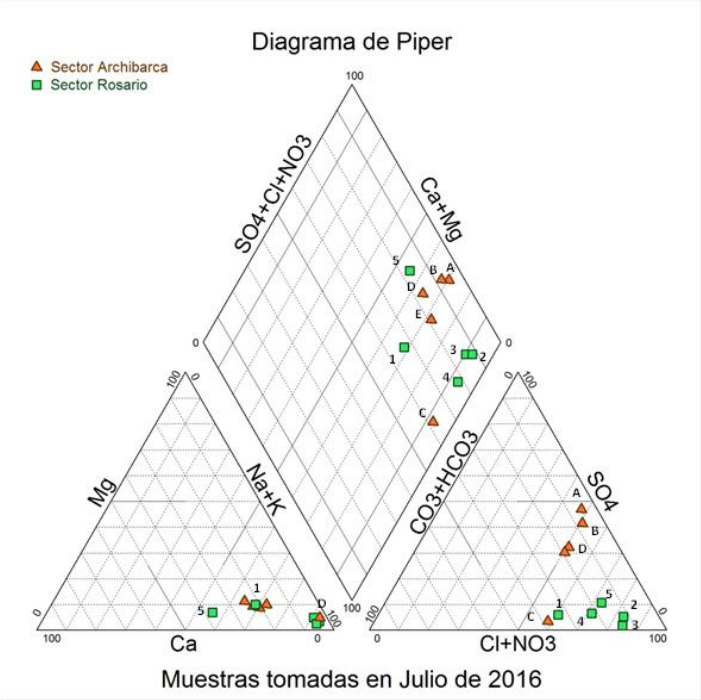



Figura 5.8: Diagrama Piper.

No obstante, existen particularidades en cada uno de los sectores: considerando que la conductividad eléctrica muestra un comportamiento influenciado por el flujo en cada uno de los sectores, se realizó un análisis de los elementos mayoritarios organizando las muestras según la dirección del flujo inferido: para Archibarca el agua procedente de las vegas se infiltra en el abanico y escurre subterráneamente hacia el salar; en el caso de Rosario se asume que el agua procedente del río Rosario se infiltra recargando el sector aluvial asociado, cuyo dominio se extiende desde el punto OSW-01 hasta el Salar.

Considerando lo anterior, la Figura 5.9 muestra que en el sector de Archibarca se aprecia un comportamiento general evolutivo de las aguas de mayor a menor concentración del punto A (Puntera 1, ubicada a 4077,68 m s.n.m.) hacia el punto E (PBI) ubicado a 3962, 3 m s.n.m. Sin embargo, de acuerdo a lo que se muestra en la Figura 6.8, el sector sur presenta una fuente de recarga a las vegas diferente a la identificada al oeste (punto A y B) de las mismas. De igual forma, las diferencias en los órdenes de magnitud para el Na+K y Cl entre los puntos A (Puntera 1) o C (Punto C) y los demás puntos, denota que ocurren procesos de precipitación de sales lo cual es

perceptible en el sector central de las vegas (Figura A.1). Por otro lado, las concentraciones de nitratos resultan ser las mismas para casi todos los puntos, salvo para el punto A, lo cual se puede explicar si se considera que este punto representa una charca de grandes dimensiones que por su proximidad al poblado de Archibarca, permite inducir que la misma se aprovecha para el suministro de agua de animales cercanos, cuyas fecas son posiblemente fuentes de contaminación.

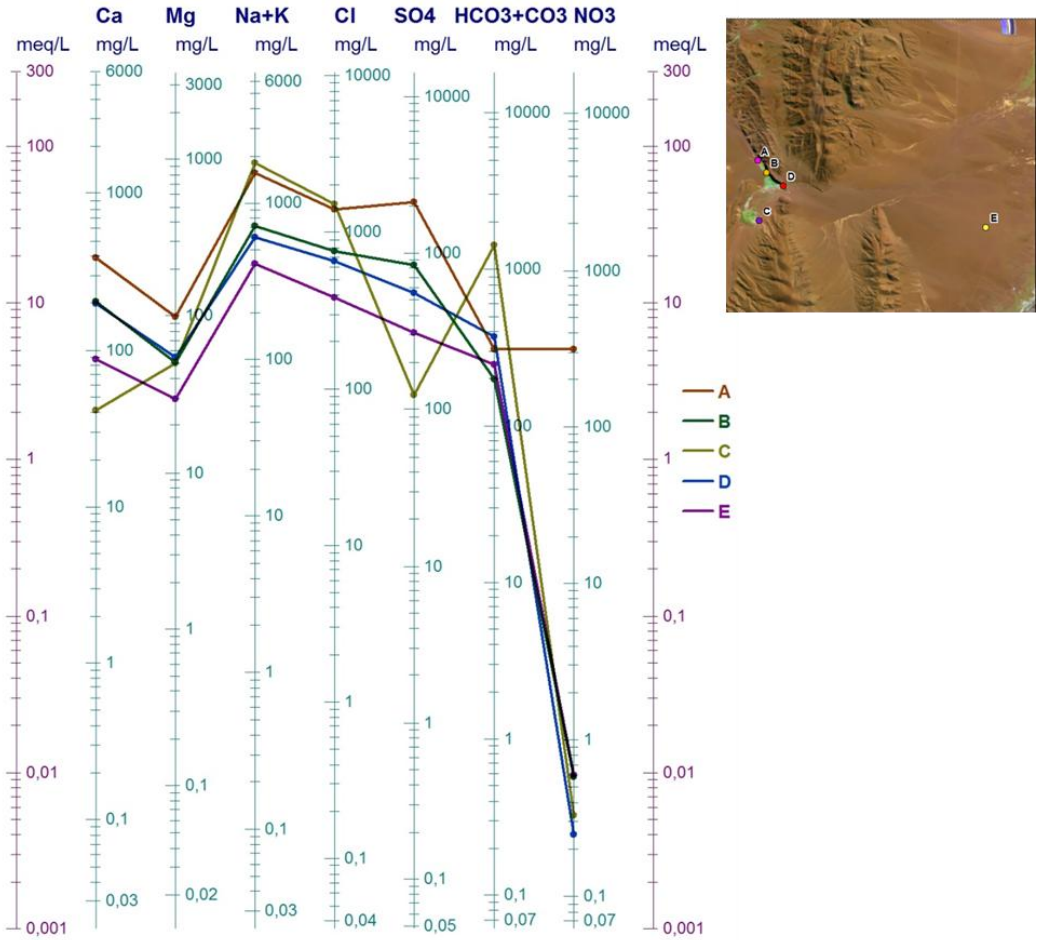



Figura 5.9: Diagrama de Schöeller-Berkaloff para el sector de Archibarca

Para el caso del delta del río Rosario, los puntos OSW-01 ubicado sobre el cauce del río, pozo “Sin Nombre” y pozo DWN, muestran una evolución desde el punto OSW-01 hacia el salar. En el caso del pozo domiciliario 2 ubicado aguas arriba del OSW-01, se aprecia claramente que su composición difiere del punto OSW-01, incluso su composición no influye o no se ve reflejada en los puntos aguas abajo, siendo evidente la dominancia del punto OSW-01 en la composición de los demás puntos analizados (Figura 5.10). No obstante, en el caso del pozo domiciliario 1 (punto 5) existe una excepción ya que se aprecia un comportamiento diferente a la tendencia evolutiva observada con el OSW-01, “Sin Nombre” y DWN, dando indicios de que sus aguas están influenciadas por aportes provenientes del este.

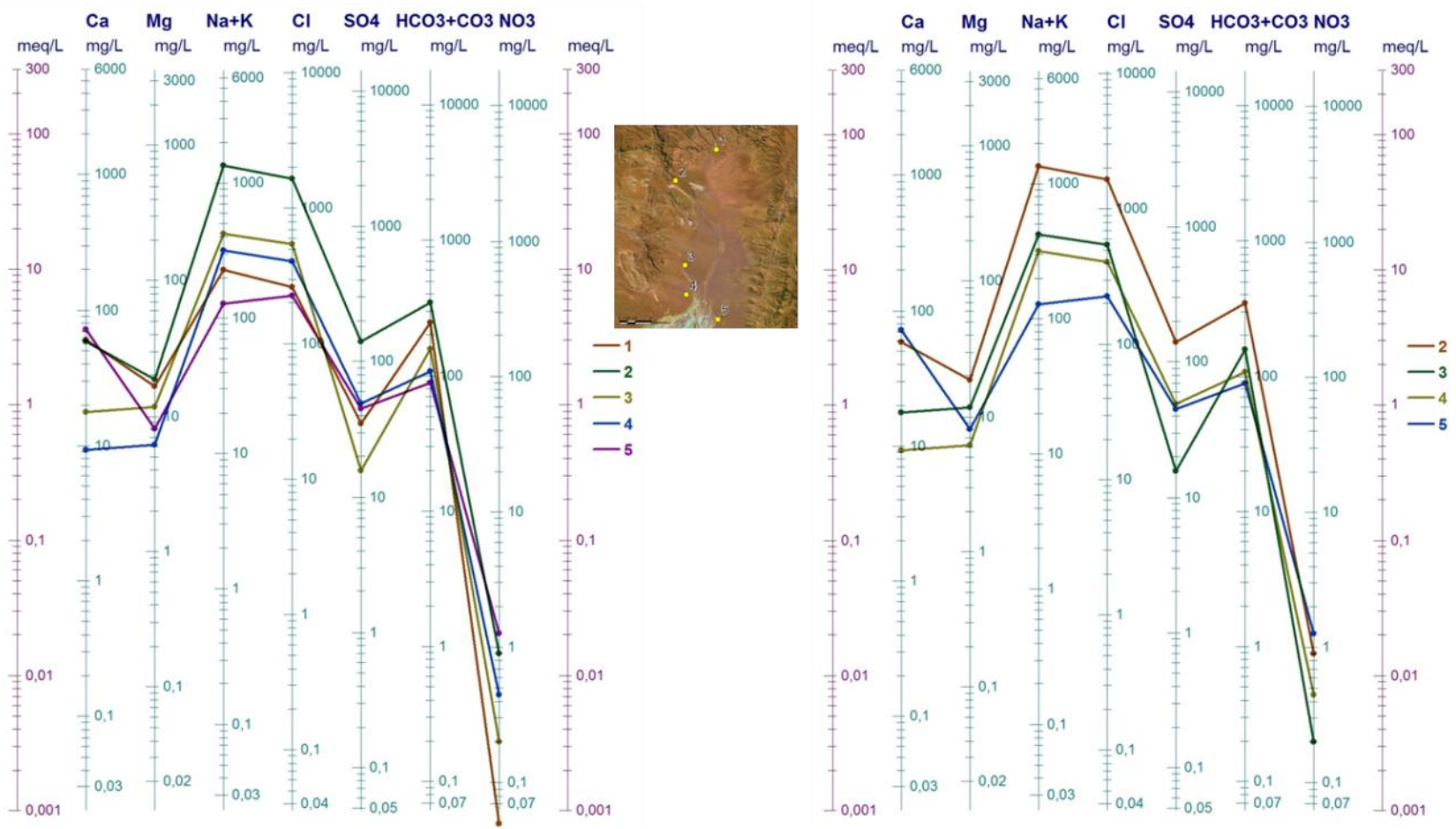



Figura 5.10: Diagramas de Schöeller-Berkaloff para el sector de Rosario. A la izquierda: todos los puntos medidos. A la Derecha: todos los puntos salvo el pozo domiciliario 2.

Sumado a los iones mayoritarios, algunos iones adicionales fueron analizados como parte del proceso de caracterización. En las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13 se presentan la distribución de los iones Boro, Litio y Estroncio cuyas concentraciones estuvieron por encima de 1mg/l. En el caso del Boro se aprecia que las menores concentraciones se asocian a los pozos domiciliarios de Rosario y del sector medio y bajo del delta del río Rosario, mientras que las concentraciones más altas se asocian al sector de las Vegas de Archibarca. En el caso del litio, se aprecia que la principal fuente del mismo procede de las fuentes superficiales, decreciendo progresivamente en dirección aguas abajo como recurso subterráneo. En el caso del estroncio sus valores más altos se vuelven a asociar al sector de las Vegas de Archibarca, siendo más bajos y dispares en el sector de Rosario

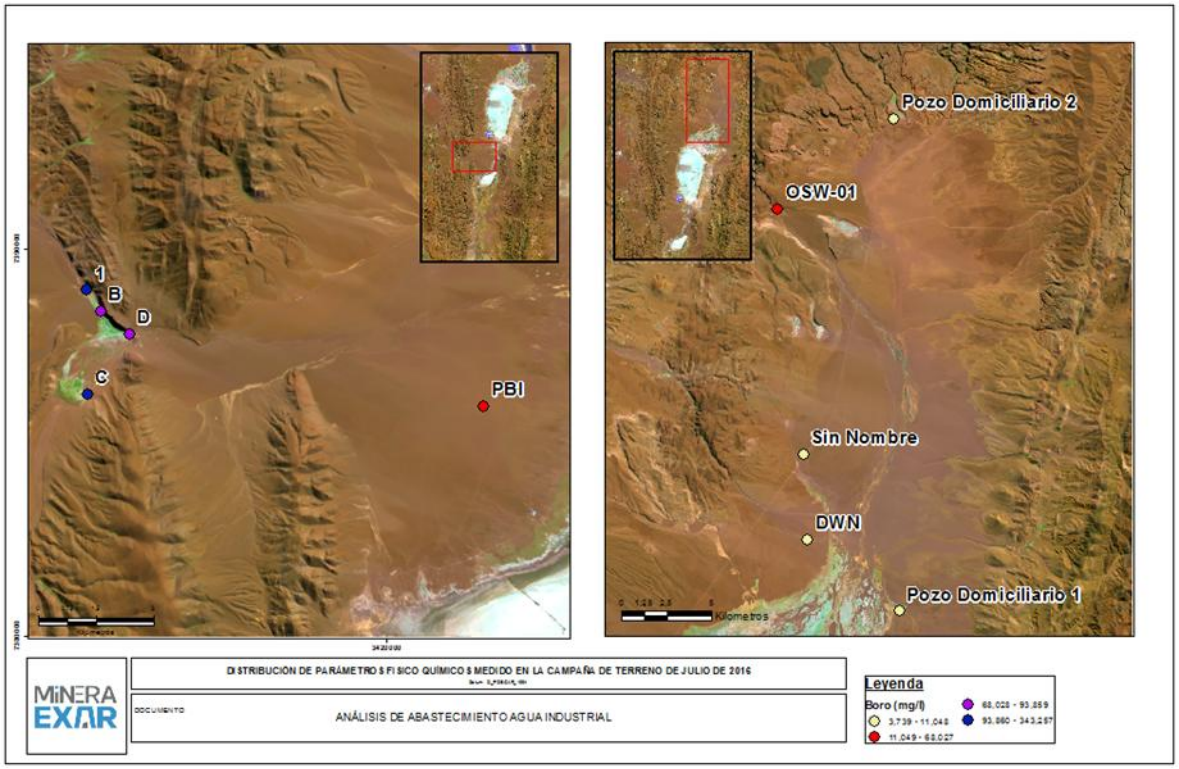



Figura 5.11: Distribución de Boro (mg/l).

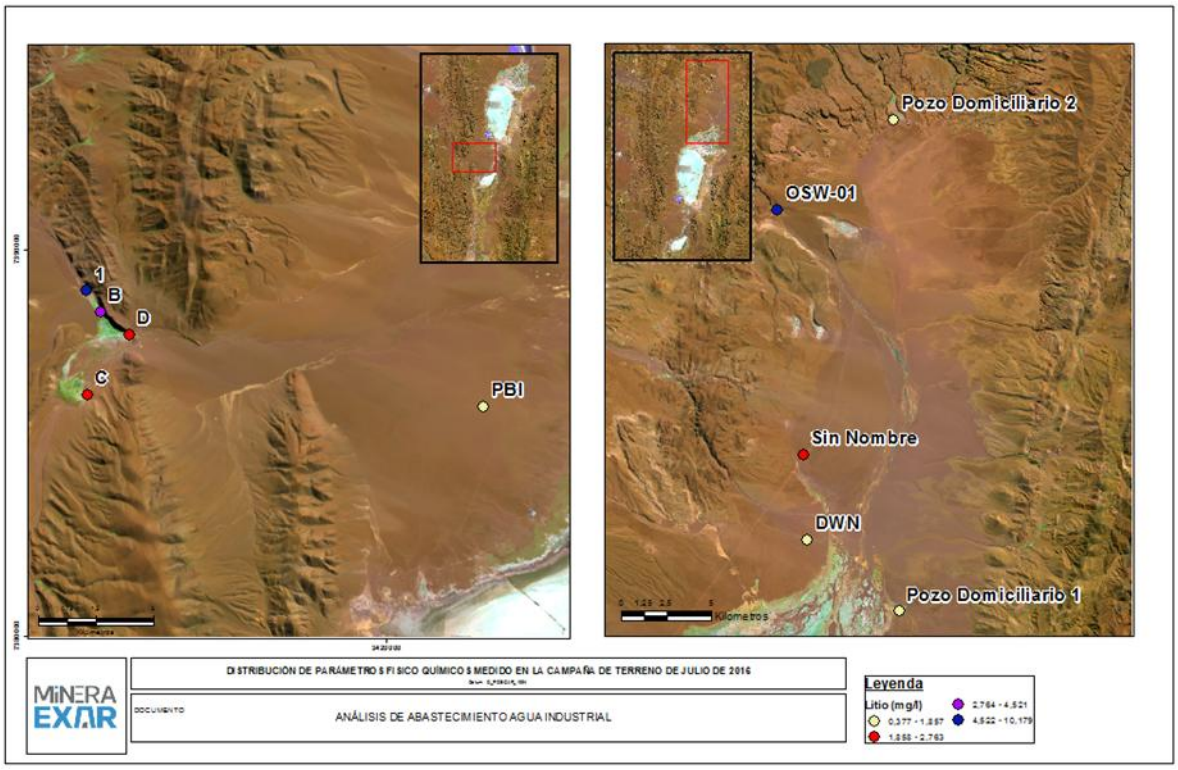



Figura 5.12: Distribución de Litio (mg/l).

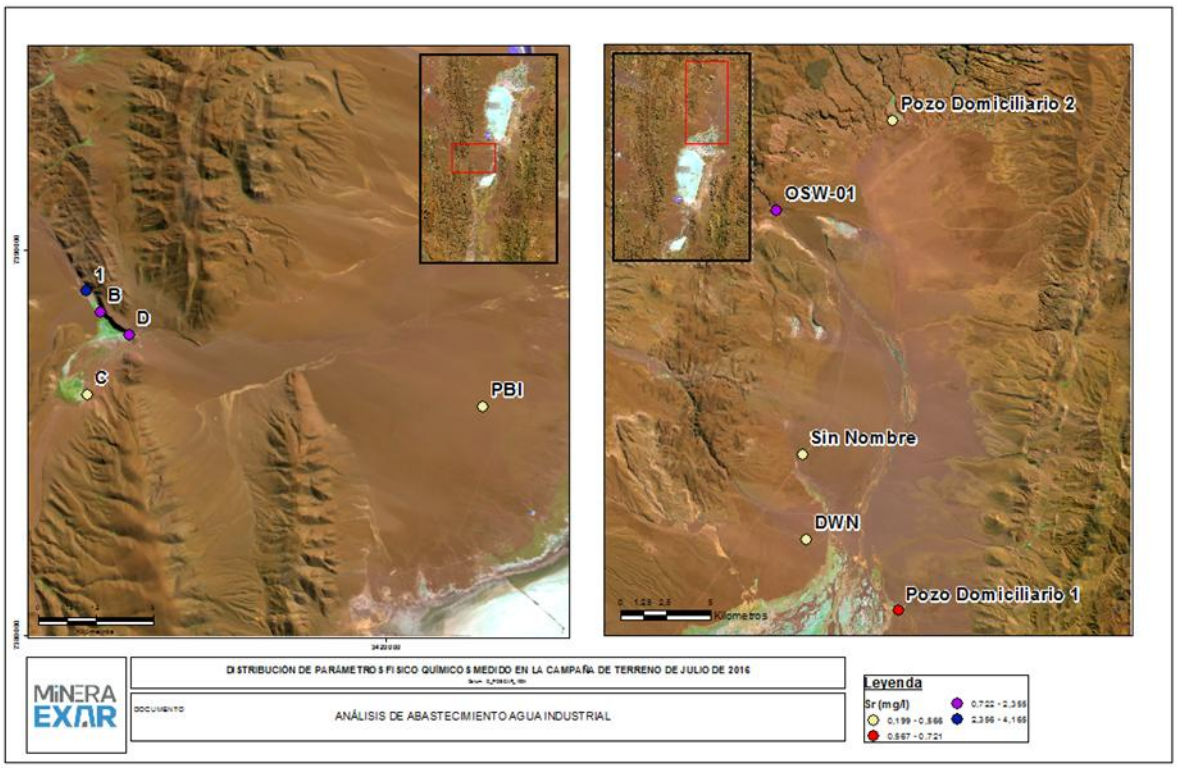



Figura 5.13: Distribución de Estroncio (mg/l).

El Fe fue otro de los iones para el cual se registraron concentraciones por encima de 1 mg/l. Sin embargo, durante el proceso de muestreo se percibió algún grado de contaminación de las muestras, especialmente subterráneas, debido a que en ocasiones se percibían residuos negros procedentes de procesos de degradación de la tubería asociada. En la Tabla 5.2 se resumen los otros iones que se analizaron pero cuyas concentraciones fueron muy bajas (menores a 1 mg/l o 1 ppm) para todas las muestras analizadas. No obstante, para algunos de los iones existieron casos particulares: en el caso del Mn el PBI mostró una concentración de 1,165 mg/l, para el Zn el punto "Sin Nombre" mostró una concentración de 1,608 mg/l y para el As el punto OSW-01 mostró una concentración de 1,110 mg/l.

| **CONCENTRACIONES** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **<1 ppm** | **<0,1 ppm** | **<0,01 ppm** | **<1ppb** | **<0,1ppb** | **<0,01 ppb** |
| $ClO_3$ | $NO_2$ | Cu | Sb | Co | Bi |
| Al | V | Mo | Cd | Pb | Ag |
| Ba | Zn | Sn | Ni | Hg | Be |
| Mn | Cr | Ti | P | Tl | |
| As | | | U | Se | |

Tabla 5.2: Iones obtenidos con concentraciones por debajo de 1 mg/l o 1 ppm.

En términos generales, se aprecia que tanto en el sector de Archibarca como en el de Rosario, el agua presenta composiciones similares en cuanto a los iones mayoritarios se refiere, con mayor o menor desarrollo de facies en cada uno de los sectores. En el caso de las aguas superficiales se aprecian mayores valores de conductividad, sólidos totales disueltos y de iones que aunque suelen ser considerados minoritarios, en esta zona cobran relevancia como el Boro, Litio y Estroncio. Para las aguas subterráneas, los valores son mucho más conservadores en comparación con las muestras superficiales. Para definir su posible uso, en la Tabla 5.3 expone las valoraciones que presentan estas muestras de agua si se destinaran las mismas para consumo humano, protección de vida acuática en agua superficial dulce, irrigación y bebida de ganado de acuerdo a la Ley 24.585 sobre Salud, Seguridad y Medio Ambiente de la República Argentina.

| **PUNTO** | **CONSUMO HUMANO** | **PROTECCIÓN DE VIDA ACUÁTICA AGUA SUPERFICIAL DULCE** | **IRRIGACIÓN** | **BEBIDA DE GANADO** |
|---|---|---|---|---|
| Pozo Domiciliario 2 | No Cumple | No Cumple | No Cumple | No Cumple |
| OSW-01 | No Cumple | No Cumple | No Cumple | No Cumple |
| Sin Nombre | No Cumple | No Cumple | No Cumple | No Cumple |
| DWN | No Cumple | No Cumple | No Cumple | No Cumple |
| Pozo Domiciliario 1 | Cumple* | No Cumple | No Cumple | Cumple* |
| Puntera 1 | No Cumple | No Cumple | No Cumple | No Cumple |
| Punto B | No Cumple | No Cumple | No Cumple | No Cumple |
| Punto C | No Cumple | No Cumple | No Cumple | No Cumple |
| Punto D | No Cumple | No Cumple | No Cumple | No Cumple |
| PBI | No Cumple | No Cumple | No Cumple | No Cumple |

Tabla 5.3: Usos del agua analizada en cada punto según la Ley n° 24585. *No se disponen de mediciones de Oxígeno Disuelto.

De acuerdo a la Tabla 5.3, se aprecia que el único punto que presenta condiciones para su aprovechamiento para consumo humano es el punto "Pozo Domiciliario 1" de acuerdo a la normativa argentina. Sin embargo, esta normativa como la de otros países no considera el Boro dentro de sus umbrales permitidos. De todas formas, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006) en la guía para la calidad de agua potable, establece que concentraciones por encima de los 0,5 mg/l de Boro ya ponen en riesgo la salud humana. De esta manera, a pesar de que el Pozo Domiciliario 1 tiene las concentraciones más bajas de Boro (3,7 mg/l), el mismo representa casi 8 veces el valor estipulado por la OMS.

Adicional a esto, se ha calculado la dureza del agua con el fin de visualizar las características al respecto de las muestras tomadas. En la Figura 5.14 se exponen los resultados en mg/l de $CaCO_3$.

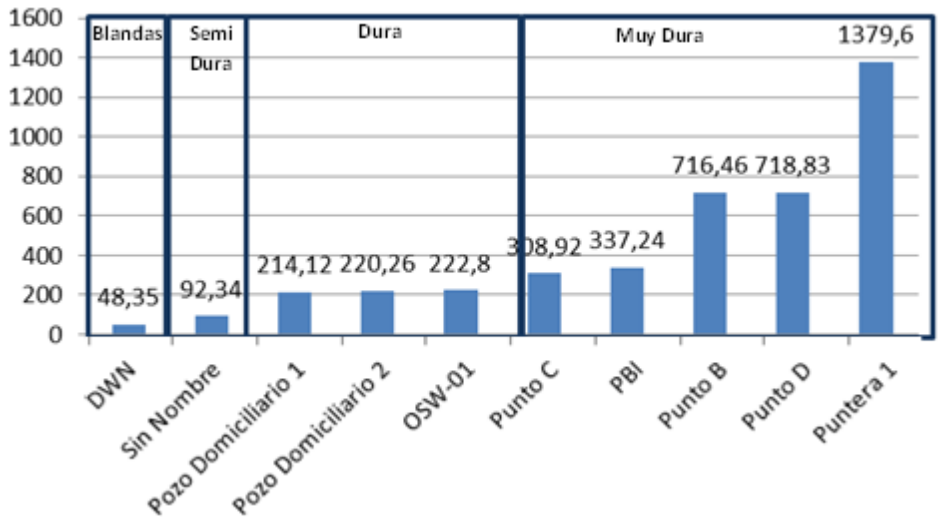



Figura 5.14: Dureza del agua expresada en mg/l de $CaCo_3$.

El límite máximo permisible de dureza para agua potable es de 300 mg/l, siendo indeseable para cualquier uso por niveles superiores a los 500 mg/l. Bajo lo anterior, se aprecia que en términos generales, las muestras del sector de Rosario son más "livianas" que las del sector de Archibarca.

Con todo lo anterior, se denota que la gran mayoría de las muestras presenta particularidades siendo principalmente el recurso subterráneo el más propicio para su utilización debido a las diferencias de Sólidos Totales Disueltos, metales y dureza, especialmente en los sectores de Rosario. Sin embargo, existen particularidades como las del pozo DWN cuyo valor de pH es anormalmente alto, o bien, como el pozo domiciliario 1 cuyas características químicas permiten su uso para consumo humano, aunque el Boro condiciona su uso (no contemplado en la normativa argentina. De esta manera, el área sur oriental del sector de Rosario parece ser una zona propicia para la explotación de agua, sin embargo, en caso de considerarse la aplicación de algún tipo de tecnología como la osmosis para la eliminación de metales o posibles contaminantes que puedan incidir en los procesos (como el Boro), deberá de considerarse que la dureza del agua es baja en este sector, lo cual puede implicar procesos adicionales para garantizar concentraciones moderadas de Ca y Mn en el producto final.

# 6. Reconocimiento en terreno de sectores de Archibarca y Rosario

## 6.1 Descripción de la zona

Considerando los antecedentes descritos en las secciones precedentes, se decidió efectuar una campaña de terreno para una caracterización adicional de la zona de las Vegas de Archibarca y el reconocimiento de la cuenca del río Rosario, con el objetivo de evaluar la factibilidad de obtener el caudal necesario para el abastecimiento de agua industrial desde estos sectores. La campaña de terreno se efectúo entre el 18 y el 21 de julio de 2016.

Los objetivos principales del trabajo de terreno fueron:

a) Realizar una caracterización de las Vegas de Archibarca para entender el balance hídrico de este sector y cuantificar su contribución a la recarga subterránea hacia el sector del Cono de Archibarca.

b) Realizar una visita de reconocimiento del delta del río Rosario con el fin de establecer criterios que orienten la definición de las potenciales zonas de aprovechamiento de agua industrial en ese sector.

En ambos sectores (Archibarca y Rosario) se tomaron muestras de agua para su caracterización química e isotópica. Los resultados de la caracterización hidroquímica se presentan en el Capítulo 5, mientras que el análisis del muestreo isotópico se encontraba en elaboración al momento de la redacción de este informe. A continuación se presenta un breve resumen de las actividades realizadas y los análisis efectuados a partir de esta campaña, mientras que el Anexo 3 discute detalles adicionales.

### 6.1.1 Sector de Archibarca

El sector de Archibarca se localiza al oeste de la cuenca del Salar de Cauchari e incluye un abanico aluvial de gran extensión en superficie y baja pendiente que dificulta su reconocimiento en terreno. Hacia el oeste y aguas arriba del abanico se encuentra un sector de vegas denominado “Vegas de Archibarca”, cuya extensión es inferior a un kilómetro cuadrado. Este sector se caracteriza por la presencia de cuerpos efímeros de agua a excepción de un cauce superficial permanente que conduce las aguas superficiales recolectadas en las vegas hacia el sector del ápice del abanico. Una vista general del sector se muestra en las fotografías de la Figura 6.1.

Figura 6.1: Vista general del sector de las Vegas de Archibarca. Fotografías tomadas el 19/07/2016.

La vegetación en el sector de las vegas es típica de la zona y se caracteriza por especies de muy bajo porte desarrolladas en superficie al nivel del suelo, las que se entremezclan con las rocas y configuran un mosaico entre litología y zonas cubiertas por vegetación.

### 6.1.2 Río Rosario

La parte baja del río Rosario se ubica en el extremo norte de la cuenca del Salar de Cauchari – Olaroz. En esta zona el río forma un delta de dimensiones considerables debido a la magnitud de sus caudales que lo hacen ser el principal curso superficial de la cuenca de Cauchari-Olaroz. La Figura 6.2 muestra una vista del río durante el período de bajos caudales, la que confirma que este constituye un curso que aporta permanentemente agua al Salar de Olaroz.

Figura 6.2: Río Rosario 100 m aguas abajo de punto de aforo OSW-01. Caudal aforado de 296 l/s. Foto tomada el 20/07/2016.

## 6.2 Actividades en sector de Archibarca

### 6.2.1 Instalación de punteras (piezómetros)

Debido a que no se conocen o no se han identificado claramente las características hidrogeológicas del sector de las Vegas de Archibarca, se consideró necesaria la instalación de cinco piezómetros. Las perforaciones se realizaron con un barreno manual y fueron habilitadas con tubería de PVC ranurada hasta la profundidad de la perforación. La localización de las punteras se propuso con el fin de contar con datos espacialmente repartidos que permitieran construir una piezometría aproximada para caracterizar el flujo del agua en el sector. Se midieron las coordenadas de cada instalación mediante un GPS cartográfico junto con las profundidades del nivel freático en cada puntera. Esta información se presenta en la Tabla 6.1. La Figura 6.3 muestra una vista general de una de las punteras instaladas.

| Punteras | Cota Nivel Terreno (m) | Altura Nivel Referencia (m) | Profundidad (m) | Cota Nivel Freático (m) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 4077,68 | 0,94 | 0,94 | 4077,68 |
| 2 | 4077,66 | 0,20 | 1,05 | 4076,41 |
| 3 | 4100,14 | 0,35 | 0,43 | 4100,07 |
| 4 | 4070,00 | 0,72 | 1,65 | 4069,06 |
| 5 | 4063,16 | 0,17 | 0,67 | 4062,66 |

Tabla 6.1: Niveles medidos el 19/07/2016 en punteras instaladas durante reconocimiento de terreno.

Figura 6.3: Puntera instalada en el sector de las Vegas de Archibarca (Puntera 1).

La Figura 6.4 muestra la ubicación de las cinco punteras instaladas durante la campaña de terreno y los niveles piezométricos estimados a partir de los niveles observados. La interpretación de los niveles piezométricos de la zona indica que el agua subterránea que aflora en las Vegas de Archibarca proviene de dos fuentes: un flujo proveniente del suroeste y otro flujo proveniente del noroeste; los cuales confluyen en el sector central de las vegas, para luego descargar hacia el sector del abanico de Archibarca. Los gradientes hidráulicos medidos en general son bajos, a excepción del sector suroccidental donde se aprecia un gradiente mucho mayor en comparación con otras zonas de la vega. La dirección del gradiente de niveles piezométricos medidos confirma que el flujo de agua subterránea que aflora en las vegas confluye hacia el centro del sector, y luego afloran en las cercanías del ápice del Cono de Archibarca hacia el cual descargan.

A pesar de que gran parte de las mediciones de niveles se efectuaron durante la mañana, se pudo constatar que el agua subterránea alumbrada en las punteras no se encontraba congelada, a excepción de la puntera 3 en donde el nivel se encontraba muy somero a menos de 8 cm de profundidad. Sin embargo, los diversos cuerpos de agua superficial estaban congelados debido a la baja temperatura ambiente.

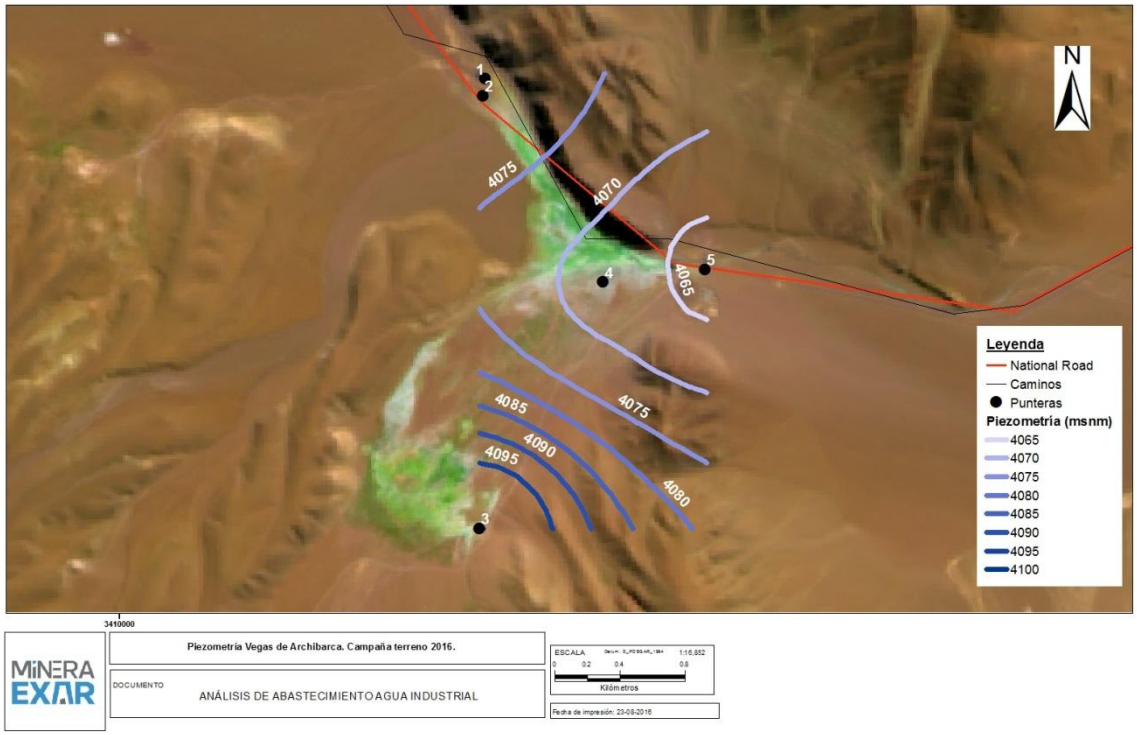



Figura 6.4: Niveles piezométricos estimados a partir de las mediciones realizadas en las punteras instaladas durante la campaña de terreno de julio de 2016.

### 6.2.2 Mediciones de evaporación

Para estimar la componente de la evaporación del balance hídrico en el sector de las vegas, se midió por un lado la evaporación de bandeja a partir de una bandeja tipo A instalada previamente en el sector, así como la evaporación desde napas someras. Para esto último, se realizaron mediciones de evaporación a partir de la aplicación de la metodología del domo (Stannard, 1988; Díaz & Pacheco, 2016) en las inmediaciones de tres de las punteras instaladas (2, 3 y 5). Estas mediciones se hicieron con intervalos de aproximadamente 45 minutos en cada punto. Debido a que se utilizó sólo un domo (Figura 6.5), el tiempo entre mediciones estaba condicionado por el tiempo necesario para remover el domo, trasladarlo a una nueva ubicación e instalarlo. Se utilizó un sensor marca Vaisala modelo HMP75 para medir la humedad relativa y temperatura al interior del domo durante intervalos de dos minutos de acuerdo a la metodología definida por Stannard (1988). En el Anexo 3 se discuten más detalles de la metodología empleada.

Las tasas de evaporación desde la bandeja de evaporación durante los días 19 y 20 de julio fueron en promedio 1,2 mm al día. Para obtener el valor de la evaporación potencial en el sector, el dato de la evaporación de bandeja se debe multiplicar por un coeficiente que representa las características o las particularidades del sector en observación (Maidment, 1993). Para el sector

se consideró que un valor del coeficiente de bandeja igual a 0,697[2] es representativo de las características del sector de estudio (Díaz & Pacheco, 2016). Considerando ese coeficiente se obtuvo un valor de la tasa de evaporación potencial igual a 0,84 mm por día.

Figura 6.5: Domo utilizado para la medición de evaporación de agua subterránea de acuerdo a la metodología de Stannard (1988).

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura 6.6 se recogen las curvas de evaporación obtenidas en cada uno de los puntos medidos. El valor de Evaporación igual a cero se ha definido de acuerdo a la hora de salida y puesta de sol en el lugar, dado que de acuerdo a Díaz & Pacheco (2016), las tasas de evaporación mantienen una estrecha relación con la radiación solar, por encima de otros factores de menor importancia.

[2] Este valor fue definido a partir de la aplicación de modelos que consideran la temperatura, humedad relativa, radiación y la vegetación de la zona. El valor utilizado aquí corresponde a una zona con similares características: salar de Coposa y Huasco ubicados a 4000 m.s.n.m. en el altiplano del Norte Chileno.

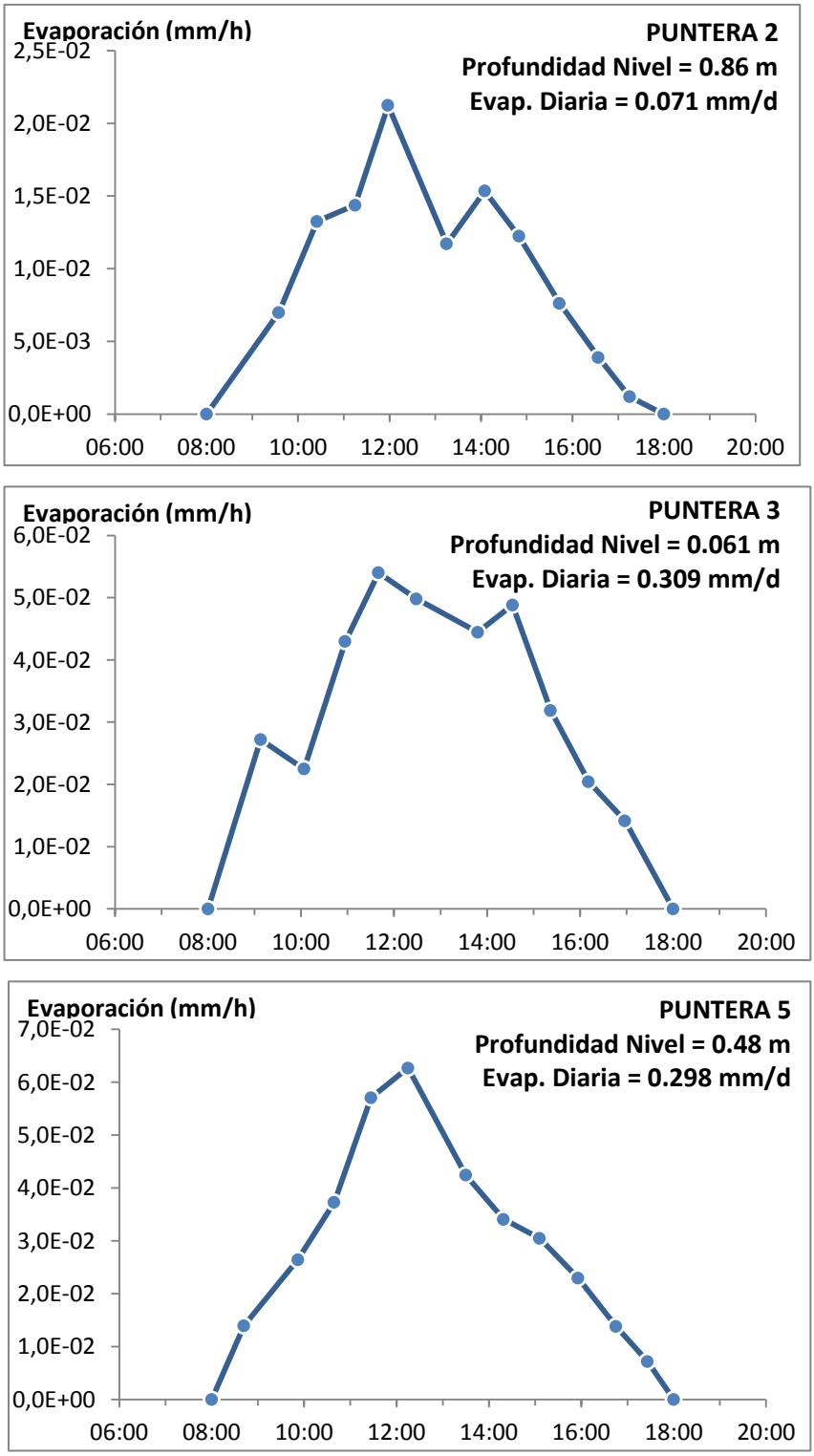



Figura 6.6: Curvas de evaporación para distintas horas del día a distintas profundidades.

En la Figura 6.6 se aprecia claramente que la evaporación presenta un comportamiento de mínimos que coincide con la hora en la que sale y se pone el sol, junto con un máximo que coincide aproximadamente con el medio día, momento en el que la influencia del sol es máxima. Por otro lado, las formas de las curvas denotan particularidades que pueden estar influenciadas por las condiciones del entorno al momento de la medición, esto es, a posibles efectos puntuales que se puedan deber a la acción del viento, cuyas velocidades varían de forma notable a lo largo del día. Por lo general, la intensidad del viento fue alta dado que en ocasiones ponía en riesgo la estabilidad del domo durante la medición.

Acoplando los datos de evaporación de bandeja y de agua subterránea, se obtuvo el gráfico mostrado en la Figura 6.7, el cual fue elaborado con el fin de intentar verificar la existencia de una curva que distinga el comportamiento de la evaporación en función de la profundidad (Johnson, 2009). El bajo valor de evaporación registrado en la ubicación de la puntera 3 que registra un nivel muy somero del agua (< 10 cm), puede explicarse porque el agua se encontraba congelada al comienzo del proceso de medición con el domo, lo que puede haber repercutido en una disminución de la tasa de evaporación.

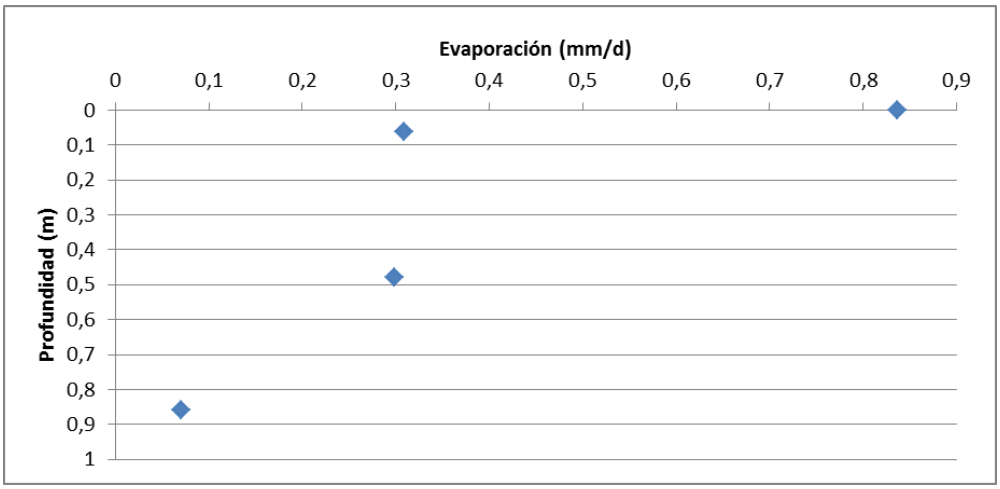



Figura 6.7: Evaporación versus profundidad de nivel freático de acuerdo a las mediciones efectuadas en el sector de las Vegas de Archibarca.

A partir de las tasas de evaporación calculadas mediante la interpretación de los datos medidos con el domo, los niveles freáticos medidos y la clasificación de la vegetación del sector, se estimó un caudal de evaporación para toda el área de las vegas de aproximadamente 3 l/s para el período del año en que se realizó la campaña de terreno (para más detalles ver Anexo 3). Cabe hacer notar que este valor no considera la demanda evapotranspirativa de la vegetación del sector.

### 6.2.3 Aforo y reconocimiento de cauces y vertientes

Para la realización del balance propuesto se identificaron previamente en oficina y posteriormente en terreno, los principales aportes superficiales que alimentaban a la vega, así como su principal

salida superficial la cual coincide con el punto OSW-02 utilizado para realizar aforos. En la Figura 6.8 se muestra la localización de los puntos aforados, los cuales coinciden con las zonas de entrada y salida identificadas previamente. Los aforos en los sitios A y D cuya ubicación se muestra en las Figuras A.5 y A.6, fueron aforados con un molinete marca OTT modelo Z400, mientras que en el punto B fue realizado con el método del flotador, y en el punto C con el método volumétrico con una probeta graduada de 1000 $cm^3$. De esta manera se realizaron cuatro aforos en el sector durante el mismo día (19 de julio de 2016). Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 6.2.

| PUNTO | CAUDAL (l/s) | MÉTODO EMPLEADO |
|---|---|---|
| A | 46,47 | Molinete |
| B | 0,11 | Flotador |
| C | 0,09 | Volumétrico |
| D | 37,5 | Molinete |

Tabla 6.2: Valores de caudal obtenidos en el sector de Archibarca, destacando el método empleado para su estimación.

### 6.2.3 Balance hídrico

A partir de los aforos de los caudales superficiales de entrada y salida de las vegas y las tasas de evaporación estimadas se obtuvo una primera estimación para el balance hídrico superficial del sector de las vegas, el cual se muestra en la Figura 6.7. La diferencia entre los caudales de salida y entrada indican un afloramiento de las napas subterráneas en el sector de las vegas. Casi la totalidad del agua que sale de las vegas en el sector del ápice del abanico corresponde a agua subterránea. La evaporación desde la zona corresponde a un caudal relativamente menor en comparación al flujo superficial de salida que constituye parte de la recarga al Cono de Archibarca. Es importante mencionar que este análisis sólo consideró la componente superficial, por lo que el caudal total de recarga hacia el Cono de Archibarca es mayor, si se considera el flujo subterráneo que pasa a través de la sección cercana al ápice.

De esta manera, se puso en evidencia que el caudal de recarga hacia el abanico debe ser a lo mínimo 40 l/s dado que la evaporación no cumple un papel importante en el balance del sistema, siendo esta suplida en gran parte por los caudales superficiales aforados de entrada. Esta conclusión se precisa a partir de la experiencia en terreno, la cual podría extrapolarse dado que en otras épocas del año pueden haber aumentos de más o menos 1 l/s en el caudal de evaporación, con mayores caudales superficiales de salida, reflejando que esta experiencia se realizó con condiciones conservadoras en comparación con otras épocas del año.

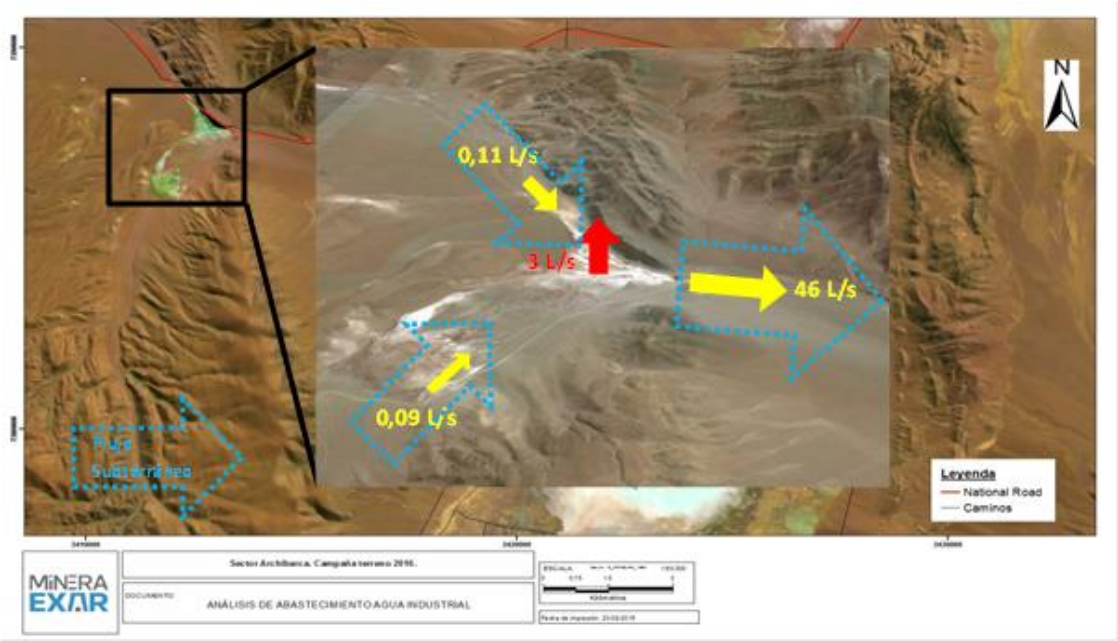



Figura 6.8: Balance hídrico realizado en el sector de Archibarca para el mes de julio de 2016.

La medición de niveles piezómetricos y la estimación del balance hídrico en el sector de las vegas, indican que la existencia de estas se debe a un afloramiento de las aguas subterráneas que posteriormente descargan hacia el Cono de Archibarca. Se espera que el análisis isotópico que se realiza en paralelo a la elaboración de este informe, verifique esta hipótesis y ayude a identificar el origen de las aguas que afloran en el sector.

### 6.2.4 Evolución de la superficie de las vegas

Debido a la importancia del afloramiento de agua subterránea para la subsistencia de las vegas, se estimó importante efectuar un análisis de la influencia de variabilidad estacional e interanual de los niveles sobre la vegetación del sector. Para esto, se realizó un estudio sobre la variación de la superficie de las vegas a partir de la combinación de las bandas 7, 4 y 1 de imágenes satelitales Landsat 7 con corrección pancromática, incluyendo imágenes captadas en verano e invierno. En la Figura 6.9 se aprecia que la superficie de la zona cubierta por las vegas identificada a partir de las imágenes satelitales se divide en dos zonas (norte y sur). La mayor extensión de las vegas ocurrió en el periodo 15/01/2013 y la menor superficie se registró el 22/06/2011. Las diferencias son relativamente menores en valor absoluto (<0,3 $km^2$), sin embargo son importantes en términos relativos si se las compara con la extensión promedio de cada zona (Tabla 6.1). En particular, la zona sur (Z.S) presenta una variación máxima de 0,29 $km^2$, la cual corresponde al 69% de la superficie promedio de esa zona (0,42 $km^2$).

| Sector | feb-11 | jun-11 | ene-12 | sep-12 | ene-13 | ago-16 | máx. | mín. | promedio |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Z.N | 0,47 | 0,36 | 0,45 | 0,46 | 0,49 | 0,45 | 0,49 | 0,36 | 0,44 |
| Z.S | 0,39 | 0,27 | 0,43 | 0,47 | 0,56 | 0,44 | 0,56 | 0,27 | 0,42 |

Tabla 6.3: Superficie cubierta por las Vegas de Archibarca ($km^2$) calculadas a partir de imágenes Landsat. Área es dividida en zona norte (Z.N) y zona sur (Z.S).

Para explicar las variaciones en la extensión de las vegas es necesario considerar las estadísticas de precipitaciones de la zona que se muestran en la Figura 6.10. El periodo cuando ocurrió la máxima superficie (enero de 2013) coincide con un periodo de eventos de precipitación, mientras que el periodo de mínima superficie (junio de 2011) corresponde a la estación seca del año. Este análisis indica que pueden existir variaciones importantes en la superficie de las vegas a nivel estacional y también a nivel interanual. También indica que el período en el cual se realizó el trabajo de terreno (julio de 2016) corresponde a un período en que la extensión de las vegas era cercana al promedio histórico, de lo cual se infiere que los niveles freáticos también se encontraban en un rango promedio, por lo que las tasas de evaporación medidas podrían aumentar o disminuir para otras estaciones o años dependiendo de la pluviometría de cada período.

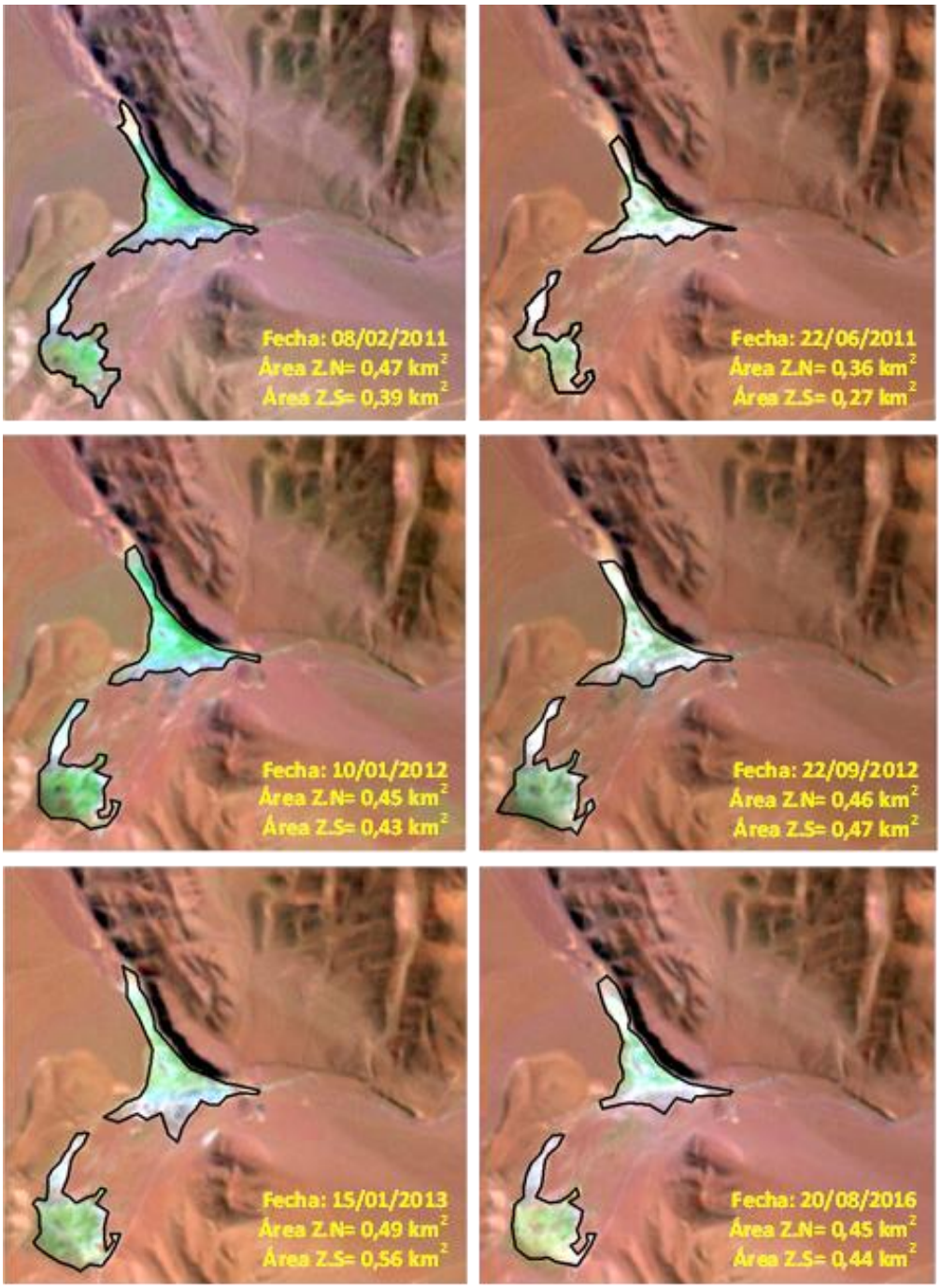



Figura 6.9: Superficie estimada de las Vegas de Archibarca a partir de imágenes Landsat. Se identificaron dos zonas o áreas: Z.N o Zona Norte y Z.S o Zona Sur.

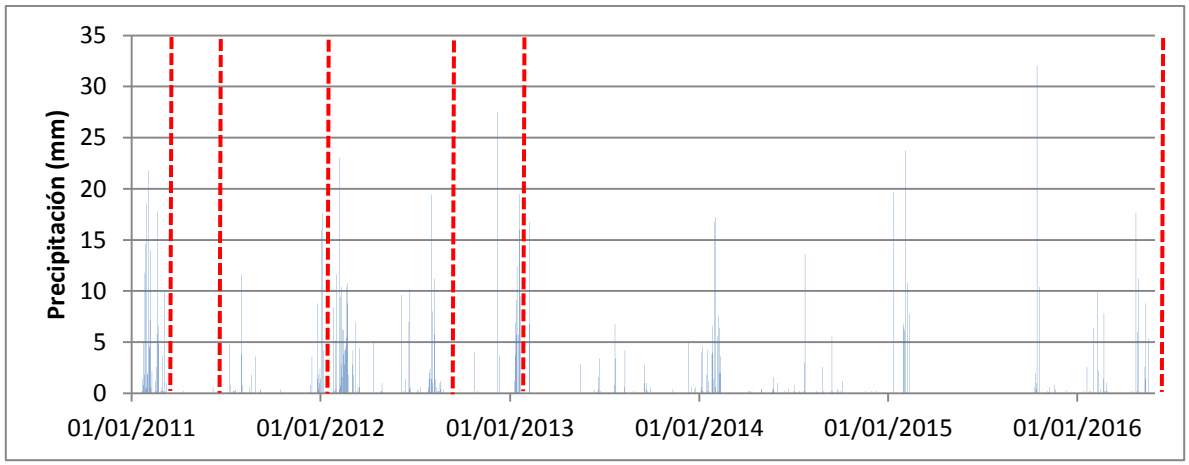



Figura 6.10: Precipitación registrada en la estación Vaisala. Líneas segmentadas corresponden a fecha de las imágenes satelitales analizadas.

## 6.3 Visita al sector del río Rosario

### 6.3.1 Descripción general

Durante el reconocimiento del área fue posible comprobar lo basto y amplio que es el sector del delta del río Rosario, conformado principalmente por materiales sedimentarios detríticos de origen aluvial lo cual junto a los datos de nivel, química y aforo, permiten reconocer la gran importancia del sector para su explotación de agua industrial.

Como parte del reconocimiento general del sector, se visitó el punto de aforo de minera Exar denominado OSW-01, en el cual se aforó con molinete un caudal de 296 l/s, además se constató la dimensión del cauce del río.

### 6.3.2 Pozos y sondajes existentes

Como parte del reconocimiento de terreno se visitaron algunos pozos domiciliarios con el fin de verificar sus profundidades, tipologías, niveles y propiedades físico-químicas de sus aguas, además de tomar muestras para su caracterización química e isotópica en laboratorio. Algunos de los pozos domiciliarios visitados se muestran en las Figuras 6.11 y 6.12. Como parte del reconocimiento también se visitó una antigua estación meteorológica ubicada en las instalaciones de la administración de la reserva de Cauchari - Olaroz.

Figura 6.11: Pozo domiciliario 1 (izquierda) y charca destinada para el consumo animal, ubicados en las instalaciones de la administración de la reserva de Cauchari-Olaroz.

Figura 6.12: Pozo domiciliario (Pozo 2) ubicado en el sector nororiental de la cuenca del río Rosario y charca utilizada para bebida de animales ubicada en el mismo sector.

Durante el reconocimiento del sector del río Rosario también se identificaron tres pozos, de los cuales no existía registro previo, ubicados al costado de la ruta principal, cuya información se resume en la Tabla 6.4.

| **Pozo** | **Latitud S** | **Longitud W** | **Cota Terreno (msnm)** | **Profundidad (m)** |
|---|---|---|---|---|
| DWN | 23°17’33.41089’’ | 66°38’42.11160’’ | 3970,55 | 200 |
| PDWN | 23°17’33.17444’’ | 66°38’42.48616’’ | 3966,85 | 14 |
| S/N | 23°15’0.00632’’ | 66°38’52.19271’’ | 3970,00 | 32 |

Tabla 6.4: Coordenadas de pozos identificados en sector del delta del río Rosario durante visita de reconocimiento.

La Figura 6.13 muestra una vista general de los tres pozos y la Figura 6.14 muestra un mapa de la zona y la ubicación de los pozos y lugares visitados durante el reconocimiento.

Figura 6.13: Pozos identificados durante reconocimiento en terreno. Izquierda, al fondo pozo DWN próximo el pozo PDWN (en primer plano). Derecha, pozo ubicado al costado de la ruta principal para el cual se desconoce otra información (denominado “Sin Nombre”).

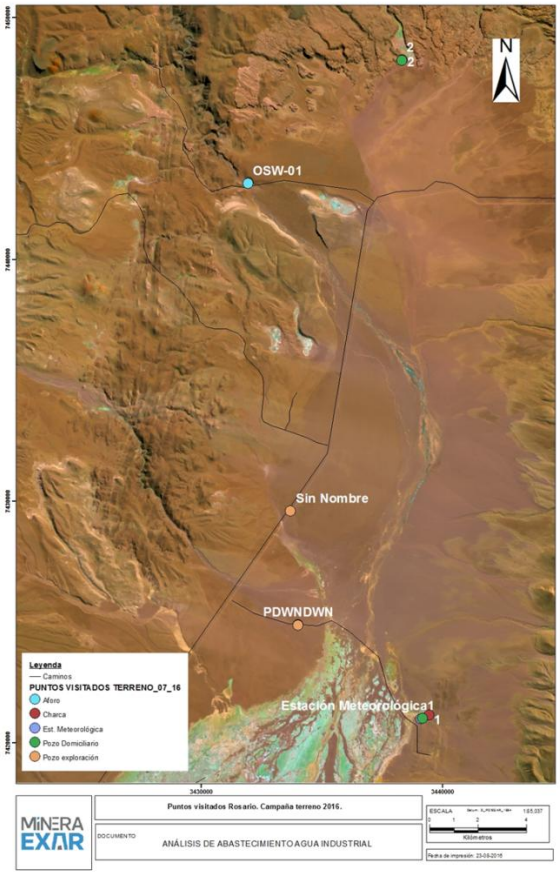



Figura 6.14: Ubicación de sitios y sondajes visitados en el sector del río Rosario.

# 7. Análisis de disponibilidad de agua industrial

## 7.1 Estimaciones Previas

El Technical Report de Orocobre de 2011 incluye estimaciones del flujo regional basado en cálculos de gradiente hidráulico, conductividad hidráulica y área de escurrimiento. Además, incluye estimaciones del volumen de almacenamiento de agua subterránea en el delta del río Rosario y el Cono de Archibarca. La Tabla 7.1 resume los valores de esas estimaciones, las cuales fueron calculadas asumiendo una porosidad efectiva de 10% para los sedimentos de ambas zonas.

| Zona | Flujo (l/s) | Almacenamiento (x $10^6$ $m^3$) |
|---|---|---|
| Delta río Rosario | 1214 | 4800 |
| Cono de Archibarca | 79 | 400 |

Tabla 7.1: Estimaciones de flujo subterráneo y almacenamiento.

Por otra parte, la PPT Cauchari-Olaroz Project geology & hydrogeology menciona una recargada estimada para Archibarca de 90 l/s y un rendimiento de 30 l/s para el pozo PBI.

## 7.2 Nuevas Estimaciones

### 7.2.1 Cono de Archibarca

El área del abanico de Archibarca (A) mostrado en la Figura 7.1 corresponde a aproximadamente 76 $km^2$. Por otra parte, sólo existe información de sondajes en la parte media-baja del cono, lo que dificulta la estimación de un espesor promedio de los sedimentos saturados. Para efectos de un cálculo aproximativo del volumen de agua embalsada consideramos un espesor saturado promedio (Hs) de 50 m y un coeficiente de almacenamiento (S) igual a 0,1[3]. El valor del espesor saturado es razonable considerando la información de la estratigrafía del cono recolectada por medio de sondajes y estudios geofísicos, la cual se resume en las Figuras 4.5 y 4.10.

Considerando los supuestos anteriores, el volumen de agua embalsada que podría ser explotada en el Cono de Archibarca sería igual a:

$$V = A \times Hs \times S = 76 \times 10^6\ m^2 \times 50\ m \times 0{,}1 = 380 \times 10^6\ m^3$$

Este valor resulta bastante similar al volumen estimado previamente.

[3] Este valor es casi un orden de magnitud superior al valor calculado a partir de la pruebas de gasto constante en el pozo PBI. Sin embargo, se considera como un valor más representativo de los sedimentos que componen el cono.

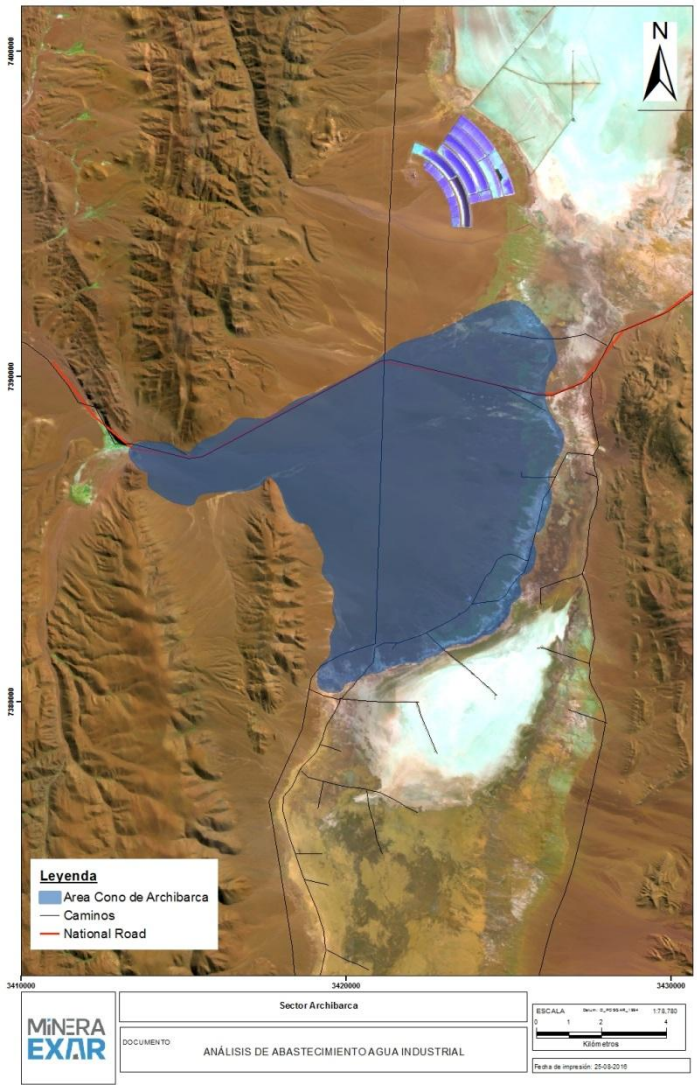



Figura 7.1: Área delimitada por el Cono de Archibarca, la cual corresponde a 76 km$^2$.[4]

### 7.2.2 Río Rosario

En el caso del delta del río Rosario, el área (A) estimada cubierta por los sedimentos no consolidados que se muestra en la Figura 7.2 corresponde a 384 km$^2$. De acuerdo a los estudios geofísicos realizados en el área por la empresa Orocobre, la potencia de los sedimentos alcanzaría los 400 metros. Para el cálculo del volumen embalsado, asumiremos un valor promedio del espesor saturado (Hs) sobre el área del delta de 150 metros y un coeficiente de almacenamiento S igual a 0,1. Entonces, el volumen de agua embalsa corresponde a

[4] Las áreas fueron definidas a partir de un análisis de imágenes satelitales con la banda 5 de la Landsat 8 de acuerdo a lo expuesto por Álvarez (1984), el cual consistió en aplicar un alto contraste a la banda 5 con el fin de distinguir diferencias en los cuerpos superficiales perceptibles en la imagen satelital. En el sector de Rosario, además, se consideró la estratigrafía de un punto consultado en los antecedentes.

$$V = A \times Hs \times S = 384 \times 10^6 \times 150\ m \times 0{,}1 = 5760 \times 10^6\ m^3$$

Este valor es del mismo orden de magnitud (20% mayor) al valor previamente calculado para el volumen de agua embalsada en el delta.

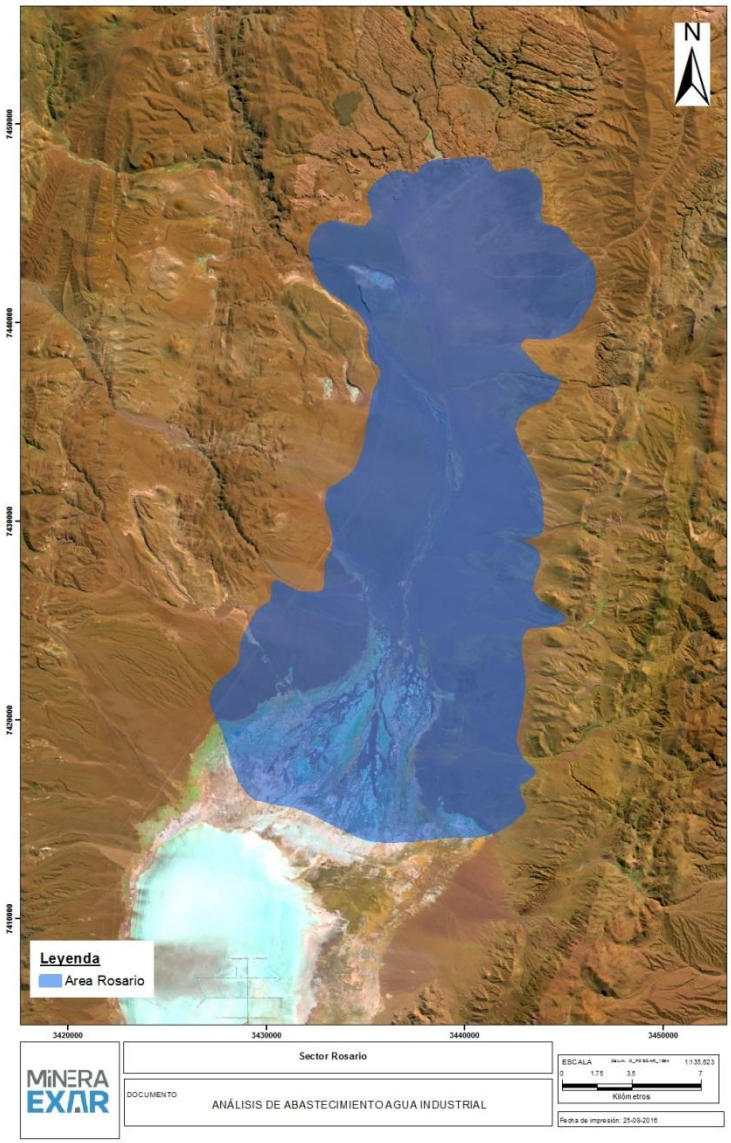



Figura 7.2: Área del delta del río Rosario, estimada igual a 384 $km^2$.

No existe información de niveles piezométricos disponibles en el área para poder efectuar una nueva estimación del flujo regional de agua subterránea.

# 8. Descripción del proyecto

El proyecto de abastecimiento de agua industrial contempla la utilización de un caudal continuo de 100 l/s más un 20% para contingencias, durante un período de 40 años.

# 9. Conclusiones

Considerando el análisis y reinterpretación de los datos existentes en cuanto a la disponibilidad de agua, ubicación del proyecto y extensión de la propiedad minera, se identificaron dos zonas prioritarias para el abastecimiento de agua industrial del proyecto, las cuales corresponden en orden de prioridad al sector del delta del río Rosario y el Cono de Archibarca. En este último sector actualmente existe un pozo de propiedad de Minera Exar con un caudal aprobado de 25 l/s.

El análisis hidrológico de la información de precipitaciones y caudales indica que la magnitud de los caudales superficiales en la zona del proyecto es variable. Relativamente bajos caudales de flujo base, pueden aumentar de forma repentina producto de precipitaciones de fuerte intensidad que ocurren durante los meses de verano. Durante un reconocimiento de la zona se observó evidencia de la gran magnitud de esas crecidas. Lo anterior indica que es poco recomendable la instalación de captaciones de agua superficial en la zona por el riesgo que sean destruidas durante eventos extremos de precipitaciones. Adicionalmente, si se considera la información referente a la calidad del agua, los cursos superficiales transportan una cantidad considerable de sedimentos lo que se traduce en mayores valores de sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y concentraciones de algunos iones.

Los valores de almacenamiento de agua subterránea estimados para los sectores del Cono de Archibarca y delta del río Rosario deben compararse con el requerimiento de agua industrial del proyecto que ha sido estimado igual a 120 l/s durante un período de 40 años de operación, lo que equivale a 151 millones de $m^3$. La Tabla 9.1 resume una comparación entre el almacenamiento de agua subterránea estimado para los sectores de Archibarca y Rosario, y el requerimiento de agua industrial del proyecto durante todo el periodo de operación. En la situación más desfavorable, la cual no considera recarga durante todo el periodo de operación del proyecto, el abastecimiento de agua industrial requeriría 40% del agua embalsada en Archibarca y menos del 3% del volumen embalsado en el sector del río Rosario. Cabe hacer notar que esta situación es altamente improbable, por lo que se incluye en este análisis sólo con el objetivo de ilustrar en términos relativos a las magnitudes de los volúmenes embalsados y a los requerimientos del proyecto.

| | Estimaciones Previas | | Nuevas estimaciones | |
|---|---|---|---|---|
| **Sector** | Almacenamiento (x $10^6$) | Consumo agua industrial como % de almacenamiento | Almacenamiento (x $10^6$) | Consumo agua industrial como % de almacenamiento |
| Cono de Archibarca | 400 | 37,8 | 380 | 39,8 |
| Delta río Rosario | 4800 | 3,2 | 5760 | 2,6 |

Tabla 9.1: Comparación de volumen ($m^3$) de almacenamiento estimado para Cono de Archibarca y sector de delta de río Rosario con requerimiento de agua para uso industrial del proyecto[5].

Adicionalmente, en etapas anteriores del proyecto se decidió que para asegurar un uso sustentable de los recursos subterráneos, el caudal máximo a ser extraído debe ser igual o inferior a la recarga media anual de los sectores afectados por la explotación. En el Cono de Archibarca actualmente se ubica el pozo PBI que tiene un caudal autorizado de 25 l/s. Adicionalmente, se deben considerar en este sector las extracciones por parte del proyecto Sales de Jujuy, las cuales han sido declaradas en 20 l/s[6]. Por otra parte, la recarga media anual estimada con la actualización del modelo hidrológico es de 87 l/s, por lo que el caudal total actualmente extraído por ambos proyectos (45 l/s) en el sector es inferior a las nuevas estimaciones de recarga para la zona. Sin embargo, asumiendo una perspectiva conservadora en cuanto a garantizar la sustentabilidad a largo plazo de las extracciones desde la zona del Cono de Archibarca, no se considera apropiado construir nuevas captaciones subterráneas en este sector. Por lo tanto, se recomienda que los nuevos puntos para el abastecimiento de agua industrial que complementen la producción del pozo actual, se ubiquen en la zona del delta del río Rosario. Asumiendo un rendimiento promedio esperado de 20 l/s por pozo (a ser verificado posterior a la habilitación), se estima que se requerirán 5 pozos adicionales para suplir la totalidad de la demanda de agua industrial del proyecto. El caudal total a ser extraído del sector del delta del río Rosario se estima que no excederá los 100 l/s más 20% por contingencias, el cual corresponde a menos del 10% del caudal promedio de recarga estimada para la cuenca Rosario-Toro (1193 l/s).

# 10. Recomendaciones

Durante la elaboración de este informe se compiló la siguiente lista de actividades o estudios que se recomienda realizar a futuro para mejorar y/o complementar la información existente:

1. Mantener el control periódico de los caudales ríos y vertientes, niveles de pozos y sondajes, y parámetros químicos y físico químicos de las aguas de la cuenca.
2. Efectuar estudios geofísicos para determinar la geometría del acuífero en el sector del delta del río Rosario. Actualmente, no se cuenta con información de esa zona generada como parte del proyecto Exar.
3. Realizar una caracterización hidrogeológica del sector del delta del río Rosario a partir de sondajes exploratorios, pruebas de bombeo, etc.

[5] No se considera ningún aporte por recarga durante todo el periodo de operación del proyecto, lo cual se considera como la situación más desfavorable, aunque poco realista.
[6] Valor reportado en página 38 de NI 43-101 de proyecto Orocobre.

# 11. Referencias


1. Álvarez E. (1984). Exploración del Salar de Pedernales (Atacama) mediante imágenes Landsat procesadas por computador. Revista Geológica de Chile, N°21, p. 77-97.

2. Díaz C., Pacheco S. (2016). Caracterización de la evaporación desde napas freáticas someras en la región de Tarapacá. Tesis realizada para optar por el título de Ingeniería Civil Ambiental. Universidad Arturo Prat, Chile.

3. Johnson J. (2009). Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del Altiplano chileno. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

4. Maidment, D. R. (1993). Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Inc. EEUU.

5. Stannard, D. I. (1988). Use of hemispherical chamber for measurement of evapotranspiration. U.S. Geological Survey.


# ANEXOS

## ANEXO A: SERIE DE AFORO ESTACIÓN SAYATE

## ANEXO B: SERIE DE PRECIPITACIÓN DE SUSQUES (RELLENADA)

## ANEXO C: RESULTADOS CAMPAÑA TERRENO

## ANEXO D: RESULTADOS LABORATORIO

## ANEXO E: RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA