

Preparado para:



DIFERENCIACIÓN DE AGUAS BAJO DEPÓSITO DE LAMAS, PROYECTO CASERONES

Informe Final

GP-INF- S-500, Rev. 0

Octubre 2016

GP Consultores Ltda.®
Recursos Hídricos y Medio Ambiente



DIFERENCIACIÓN DE AGUAS BAJO DEPÓSITO DE LAMAS, PROYECTO CASERONES

Informe Final

GP-INF-S-500, Rev. 0

Octubre 2016

Este estudio ha sido desarrollado bajo los estándares establecidos por un Sistema de Gestión de Calidad aprobado por Bureau Veritas Certification conforme con ISO 9001:2008. Certificado Bureau Veritas Certification: 4018

Elaboró	Revisó	Aprobó
Equipo Profesional	Emilio Fernández Ing. Civil (Hidráulica), MSc	Alejandro Grilli Ing. Civil (Hidráulica)
Septiembre 2016	Septiembre 2016	Octubre 2016

EQUIPO PROFESIONAL

Alejandro Grilli	: Ing. Civil (Hidráulica)
Ramón Aravena	: Geoquímico PhD. Control de Calidad Técnico.
Emilio Fernández	: Ing. Civil (Hidráulica), MSc.
Rossana Tapia	: Geólogo
Cristóbal Cox	: Ing. Civil (Hidráulica), MSc.
Katiuska Briceño	: Ing. Geólogo
Makarena Ávila	: Químico
Angello Lillo	: Cartógrafo

INDICE DE MATERIAS

	<u>Pág.</u>
RESUMEN EJECUTIVO	1
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Objetivos del Estudio	4
1.2 Antecedentes Generales	5
1.3 Organización del Informe	8
2. ANTECEDENTES	9
2.1 Hidrogeología	9
2.2 Calidad de Aguas	14
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	16
3.1 Actividades Desarrolladas	16
3.2 Puntos de Monitoreo	16
3.3 Metodología de Muestreo	22
3.4 Metodología de Análisis	27
4. RESULTADOS	31
4.1 Mediciones de Terreno	31
4.2 Análisis de Laboratorio	48
5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	59
5.1 Descripción del Sistema Hidrogeológico	59
5.2 Revisión de la Base de Datos Hidroquímica	71
5.3 Calidad de las Aguas en Septiembre 2015 y Febrero 2016	86
5.4 Variación Hidroquímica en la Columna de Agua de los Pozos	100
5.5 Análisis Isotópico	103
5.6 Esquema de Funcionamiento del Sistema	114
5.7 Relaciones Espaciales de Mezcla	116
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
6.1 Hidrogeología	119
6.2 Hidroquímica	121
6.3 Isótopos	122
6.4 Diferenciación de Aguas	122
6.5 Recomendaciones	123
ANEXO A: DIMENSIONES EXTERNAS Y DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS HABILITACIONES	
ANEXO B: METODOLOGÍA DE MUESTREO	
ANEXO C: CERTIFICADOS DE LABORATORIOS	
ANEXO DIGITAL: FILMACIONES EDITADAS DE POZOS	

RESUMEN EJECUTIVO

El Proyecto Minero Caserones de SCM Minera Lumina Copper Chile (MLCC) presenta entre sus instalaciones un depósito de lamas (fracción fina de los relaves), el cual se ubica en la quebrada La Brea. Este depósito entró en operación junto con la planta concentradora, el 31 de Mayo de 2014. En Septiembre de ese mismo año, los niveles y las concentraciones de sulfatos de las aguas subterráneas comenzaron a subir en los pozos de monitoreo ubicados aguas abajo del muro del depósito, activándose en Noviembre de 2014 el procedimiento de remediación acordado en la autorización ambiental, ya que se asume que dichos cambios fueron originados por fugas de agua del depósito. Al operar el sistema de remediación acordado y existente, se observó que fue insuficiente para contener el flujo de aguas producido (fugas), por lo que se tuvieron que construir nuevos pozos de bombeo, que complementarían la barrera hidráulica inicialmente considerada.

El objetivo principal del presente estudio es identificar y evaluar la influencia de las fugas de aguas desde el depósito de lamas, en las aguas subterráneas del sector acuífero de la quebrada La Brea, aguas abajo del depósito.

En la quebrada La Brea, aguas abajo del depósito de lamas, se identifican 3 unidades hidrogeológicas: una Unidad de Sedimentos No Consolidados, una Unidad de Roca Fracturada y el Basamento Granítico. El acuífero es del tipo libre, desarrollado tanto en la Unidad de Sedimentos como en la Roca Fracturada.

Además de las mediciones regulares que efectúa MLCC, y para lograr un mayor conocimiento del sistema y de lo ocurrido, en Septiembre de 2015 y Febrero de 2016, GP Consultores Ltda. efectuó dos campañas de muestreo, para análisis físico-químico e isotópico de las siguientes aguas:

- ◆ aguas del depósito de lamas,
- ◆ aguas subterráneas y superficiales en sectores fuera del área de influencia del depósito de lamas (quebradas afluentes y río Ramadillas aguas arriba de la confluencia con quebrada La Brea),
- ◆ aguas subterráneas y superficiales en sector dentro del área de influencia del depósito de Lamas (sector aguas abajo).

En estas últimas aguas, se tomaron muestras a distintas profundidades, tanto en los pozos recientemente construidos (2015), como en los pozos de monitoreo y en los multipiezómetros

existentes, lo cual permitió obtener una representación tridimensional (visión en planta y en profundidad) del sistema de aguas subterráneas.

En las campañas realizadas por GP también fueron filmados los pozos en los cuales se recolectaron las muestras de agua, con el objetivo de verificar la habilitación y estado de los mismos. De igual forma, en el presente informe se incluyen los antecedentes de los perfiles estratigráficos de los pozos construidos en la quebrada La Brea.

El estudio efectuado permite postular conclusiones sobre la influencia y alcance de las fugas de aguas del depósito de lamas en la calidad de las aguas subterráneas del sector acuífero de la quebrada La Brea, aguas abajo del depósito de lamas.

Se concluye que existe una clara diferenciación isotópica e hidroquímica entre las aguas subterráneas de aguas arriba del depósito (de la quebrada La Brea, de la quebrada Roco, que para efectos del presente análisis las denominaremos “aguas naturales”), y las aguas del depósito de lamas y aguas subterráneas ubicadas aguas abajo del depósito. La diferenciación se basa principalmente en sus “marcas isotópicas” y las concentraciones de sulfatos (como “marca hidroquímica”).

Aguas abajo del depósito de lamas, las aguas subterráneas (y los pozos que las representan) son agrupadas en dos sectores:

- ♦ Zona de Recuperación, correspondiente al sector comprendido entre el muro y la zanja corta fuga, incluyéndola, y
- ♦ Zona de Remediación, correspondiente al sector entre la zanja corta fugas y el río Ramadillas.

Aguas abajo del muro del depósito de lamas y en la dirección del flujo de las aguas subterráneas, se observa que existe mezcla entre aguas del depósito de lamas con aguas subterráneas naturales (representadas por las aguas localizadas aguas arriba del depósito).

En la Zona de Recuperación, las aguas subterráneas corresponden prácticamente en su totalidad a aguas del depósito de lamas, con un porcentaje promedio de aguas naturales del 5% para la primera campaña y del 15% para la segunda.

Se observa además que existe una clara diferenciación (en las “marcas” químicas e isotópicas) entre las aguas subterráneas de la Zona de Recuperación y las aguas subterráneas de la Zona de Remediación. Esa diferenciación se origina por efecto de la zanja corta fuga, la cual está interceptando y sacando del sistema acuífero, un porcentaje importante de las aguas fugadas desde el depósito de lamas.

En la Zona de Remediación, la influencia de las aguas del depósito es mucho menor, y las aguas naturales se vuelven más importantes (mayor porcentaje de aguas naturales) a medida que se avanza en la dirección del flujo subterráneo hacia su descarga en el sistema acuífero del río Ramadillas. Entre la primera y la segunda campaña el porcentaje de aguas naturales promedio,

creció desde un 28% a un 51%, observándose incluso, en la segunda campaña, pozos con aguas influenciadas por aguas provenientes del sector asociado al río Ramadillas.

Finalmente, en las aguas del río Ramadillas, que fueron muestreadas solamente en la segunda campaña, no se observa un cambio notorio entre aguas arriba y aguas abajo de la quebrada La Brea, con lo cual se asume que es poco significativo la eventual influencia de las fugas de agua del depósito en las aguas del río Ramadillas.

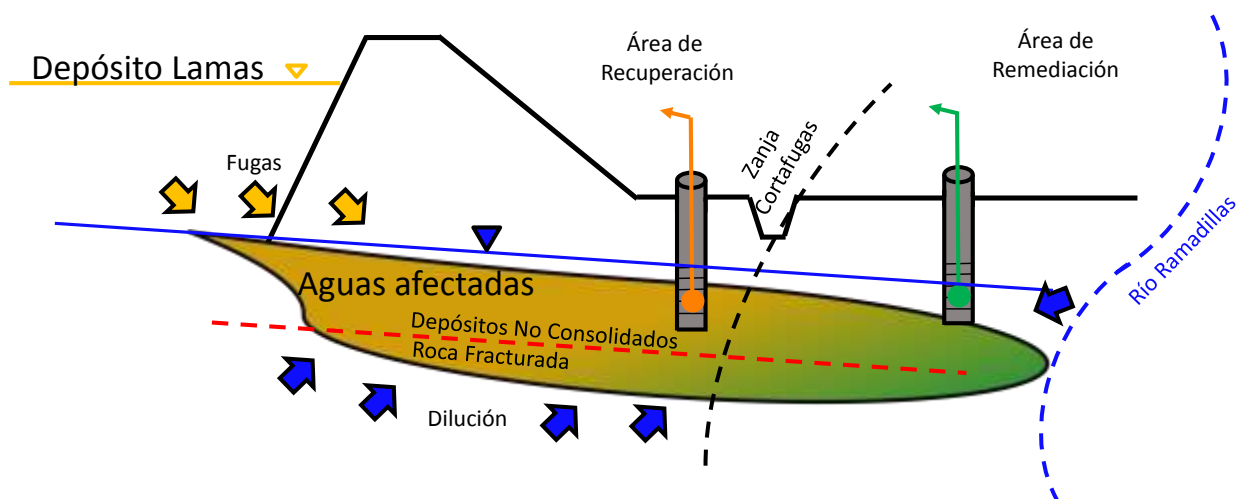


Figura N°0.1: Esquema de funcionamiento de sistema actual en quebrada La Brea.

GP, Octubre 2016.

1. INTRODUCCIÓN

SCM Minera Lumina Copper Chile (MLCC) ha solicitado a GP Consultores Ltda. (GP) desarrollar un estudio que permita identificar qué participación tienen las aguas industriales en las aguas subterráneas de la cuenca de la quebrada La Brea, producto de las filtraciones producidas desde el Depósito de Lamas localizado en este sector.

Para ello, se ha contemplado la realización de dos campañas de monitoreo en el sector, una en Septiembre de 2015 y la otra en Febrero de 2016. En ambas actividades se realizaron muestreos físico-químicos e isotópicos de las aguas presentes, tanto del sector aguas arriba del depósito (llamadas “aguas naturales”), como aguas del depósito mismo y del sector aguas abajo.

En el muestreo de aguas subterráneas, en el sector aguas abajo del depósito, se tuvo la oportunidad de tomar muestras a diferentes profundidades, tanto en los pozos recientemente construidos (2015), como en los multipiezómetros existentes, lo cual permitió obtener una representación tridimensional del sistema de aguas subterráneas.

El presente informe corresponde principalmente al análisis de las mediciones efectuadas por GP, diferenciando las aguas que provienen del depósito de lamas, de las aguas naturales de la cuenca de la quebrada La Brea. Basado en esa diferenciación, se evalúa el porcentaje de aguas provenientes del depósito de lamas que es posible observar en las aguas subterráneas del sector acuífero de aguas abajo del depósito de lamas.

1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo principal del estudio es identificar y evaluar qué influencia han tenido las fugas de aguas desde el depósito de lamas (a febrero 2016), en las aguas subterráneas del sector acuífero de la quebrada La Brea, aguas abajo del depósito.

Para lo anterior, se contempla el levantamiento de datos hidroquímicos e isotópicos en diferentes períodos (posterior y previos a las lluvias).

1.2 ANTECEDENTES GENERALES

a) Proyecto Caserones

El Proyecto Minero Caserones de SCM Minera Lumina Copper Chile (MLCC), se ubica en la cordillera de la región de Atacama, en las nacientes del río Copiapó. Es un yacimiento tipo pórfido cuprífero que actualmente produce cobre mediante procesos de lixiviación y de flotación.

Los relaves provenientes del proceso de flotación, son ingresados a ciclones para separar la fracción fina (lamas) de la fracción gruesa (arenas). Las lamas son posteriormente sometidas a un proceso de espesamiento y, con una concentración de sólidos en peso del 65%, son transportadas gravitacionalmente por tuberías y canaletas hacia su disposición final en el depósito de lamas, construido en la quebrada La Brea.

El muro del depósito de lamas, en la quebrada La Brea, está constituido por material de empréstito, obtenido de la explotación de canteras ubicadas en zonas adyacentes al muro y cubeta. El proyecto contempla un crecimiento del muro hacia aguas abajo con empinamiento de talud, y con membrana impermeabilizante en el talud de aguas arriba.

En la base del muro existe un sistema de drenaje que intercepta las aguas que se pudiesen infiltrar a través del material del muro. Aguas abajo del pie del muro se ha construido una zanja corta fuga, que permite interceptar las filtraciones que no hayan sido captadas por el sistema de drenaje basal. Ese sector se ha denominado zona de recuperación de eventuales filtraciones del depósito. Además, aguas abajo de esos sistemas, se han construido pozos de monitoreo que permiten controlar la calidad de las aguas, y pozos de bombeo, que permitirían actuar como una segunda cortina de control de filtraciones (barrera hidráulica), en caso que la calidad de las aguas se observe alterada con respecto a su calidad histórica.

Así, el proyecto contempla dos sectores aguas abajo del muro:

- ♦ Una Zona de Recuperación, que comprende al sector entre el muro y la zanja corta fuga, incluyéndola, y
- ♦ Una Zona de Remediación, correspondiente al sector entre la zanja corta fugas y el río Ramadillas.

Para evitar que las aguas superficiales ingresen a la cubeta del depósito, existen dos sistemas de conducciones -norponiente y suroriente- que rodean el depósito de lamas (canales de contorno), los cuales captan las aguas de las quebradas afluentes (por medio de bocatomas) y las transportan directo hacia el río Ramadillas, sin que entren en contacto con las lamas.

b) Filtraciones desde Depósito de Lamas

La Planta Concentradora fue puesta en marcha el 31 de Mayo de 2014, comenzando en esa fecha el transporte de lamas hacia el depósito en la quebrada La Brea.

Poco después de comenzar a operar el depósito (Septiembre de 2014), los niveles de aguas y la concentración de sulfatos comenzaron a subir en los pozos de monitoreo ubicados aguas abajo

del muro, activándose en Noviembre 2014 el procedimiento de remediación acordado en la autorización ambiental.

De acuerdo al informe de seguimiento anual 2014-2015 del Plan de Monitoreo Robusto, efectuado por MLCC-Caserones, la activación de la remediación en La Brea se atribuye a fugas de agua (filtraciones) desde el depósito de lamas La Brea. Esas fugas son capturadas por los drenes, zanja corta fuga y pozos de remediación, buscando evitar que se propaguen hacia el acuífero y al río Ramadillas.

Los resultados de las medidas implementadas indican que la remediación no fue capaz de controlar totalmente las fugas de aguas, debido a que la magnitud de éstas habría superado el caudal de diseño del sistema de remediación.

En el informe de MLCC se plantea que las diferencias entre las magnitudes estimadas y observadas de las fugas se originarían por dos factores principales:

- ♦ Las variables incluidas en el modelo hidrogeológico y con el cual fue diseñado el sistema de control de infiltraciones, subestiman la infiltración y la velocidad de transporte del agua en el subsuelo de la quebrada La Brea. Específicamente, consideran que la permeabilidad (conductividad hidráulica) del material aluvial y de la roca alterada subyacente, es mayor a la considerada en el modelo, lo cual repercute en que la velocidad de propagación de las fugas de agua es más rápida a lo evaluado.
- ♦ Generación de condiciones que favorecen la infiltración: Mayor cantidad de agua en las lamas, con una granulometría del material depositado más gruesa que lo proyectado. Ambos factores aumentan la superficie de agua en contacto con el muro, respecto a lo proyectado.

Para complementar el sistema de control de fugas, durante el año 2015 se construyeron 9 pozos de bombeo, de manera de mejorar la eficiencia de intercepción de aguas del depósito de lamas. Todos los pozos se encuentran en la Zona de Recuperación, 6 de ellos aguas arriba de la zanja corta fugas, y 3 complementando el borde norte de esta obra de intercepción.

La configuración de las instalaciones en la quebrada La Brea se muestra en la **Figura N°1.1**, en donde se sitúan también las áreas finales del depósito de lamas y de un depósito de lastre que se ubica en la cabecera de una de las quebradas que drena hacia la quebrada La Brea. Se distinguen en esta figura las 5 zonas importantes a considerar para el estudio:

- 1) Zona Aguas Arriba del Depósito de Lamas: Que incluye entre otras las quebradas La Brea y Roco, cuyas aguas superficiales son captadas por los canales de contorno. También incluye al río Ramadillas aguas arriba de su confluencia con la quebrada La Brea.
- 2) Zona del Depósito de Lamas: Que incluye las aguas claras del depósito y las aguas captadas por los drenes.

- 3) Zona de Recuperación Aguas Abajo del Depósito de Lamas: Incluye los nuevos pozos de bombeo (9 pozos PRLB) y la zanja corta fuga.
- 4) Zona de Remediación Aguas Abajo del Depósito de Lamas: Incluye los 5 pozos de bombeo que se encuentra entre la zanja corta fuga y el río Ramadillas.
- 5) Zona Río Ramadillas Aguas Abajo de la confluencia con Quebrada La Brea.

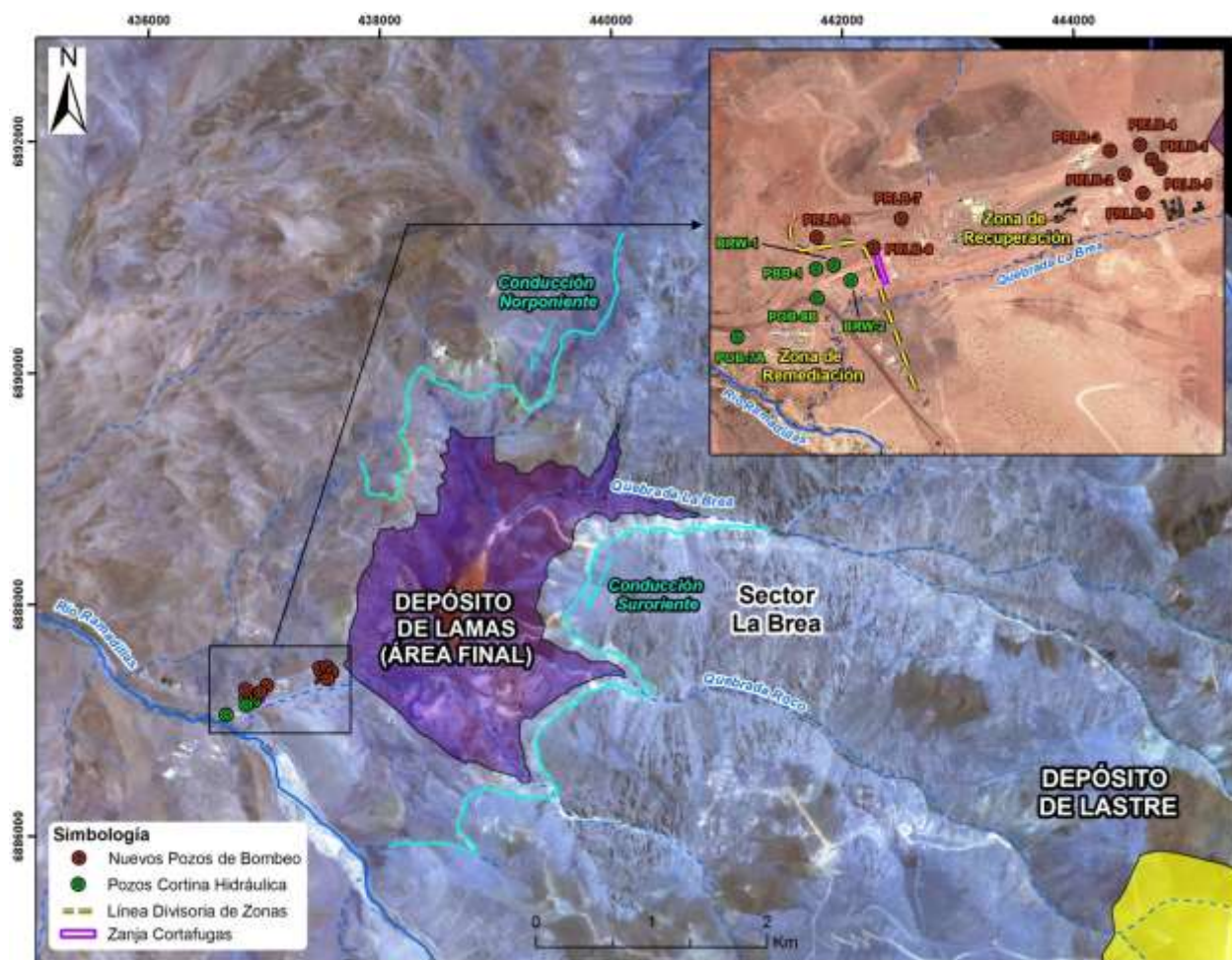


Figura N°1.1: Configuración de instalaciones del proyecto Caserones en la quebrada La Brea.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

Con el objetivo de facilitar la presentación del análisis efectuado, el informe ha sido organizado en los siguientes capítulos:

Capítulo 2: Antecedentes.

Capítulo 3: Metodología de Trabajo.

Capítulo 4: Resultados.

Capítulo 5: Discusión de los Resultados.

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones.

2. ANTECEDENTES

2.1 HIDROGEOLOGÍA

Los antecedentes disponibles a la fecha y que se estiman más relevantes sobre las condiciones hidrogeológicas del área de estudio, son obtenidos de los siguientes informes:

- ♦ **Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Anexo V-7. Informe Hidrogeológico.** Schlumberger, Septiembre 2008.

En este estudio se definen dos Unidades Acuíferas, denominadas Superior e Inferior. La unidad Superior está constituida por los depósitos sedimentarios de los cauces actuales de quebradas, esteros y ríos. En general se trata de gravas y arenas de origen fluvial y fluvio-aluvional, regular a mal seleccionadas, que rellenan los mencionados cauces. El acuífero Inferior está constituido por rocas sedimentarias del Mesozoico correspondientes a areniscas de grano medio a muy fino de color rojizo.

En el sector de la quebrada La Brea se desarrolla un acuífero superior de baja permeabilidad, constituido principalmente por suelos coluviales y depósitos aterrazados antiguos. El acuífero inferior se presenta en la parte baja de este sistema, en la junta con el río Ramadillas. En este sector, el acuífero superior sobreyace a rocas sedimentarias Mesozoicas, las cuales presentan un bajo nivel de permeabilidad y coeficiente de almacenamiento.

- ♦ **Estudios Hidrogeológicos Complementarios Control Infiltraciones Depósitos de Lamas. Quebrada La Brea.** Proyecto Caserones Rev. A. SRK Consulting, Enero 2011.

En este estudio se realiza la actualización del Modelo Hidrogeológico y Numérico existente. Durante la ejecución de este estudio se desarrollaron las siguientes labores de terreno:

- ✓ Perforación de 2 pozos de bombeo y 5 de observación aguas abajo del muro del depósito de lamas;
- ✓ Perforación de 3 pozos de bombeo exploratorio en sector de barrera hidráulica.
- ✓ Perforación de 6 piezómetros en las partes altas de la Quebrada La Brea para medir los niveles de aguas subterráneas;
- ✓ Perforación de 1 sondaje diamantino para calibrar la estratigrafía (recuperación continua);
- ✓ Realización de pruebas de bombeo individuales, de caudal variable y constante, en los 5 pozos de bombeo perforados aguas abajo de la presa.
- ✓ Prueba de bombeo simultánea de larga duración en los 3 pozos de bombeo exploratorio;
- ✓ Control de niveles de agua en los pozos del área en forma periódica;

- ✓ Recolección de muestras de agua para análisis químico; y
- ✓ Verificación de rasgos geológicos estructurales.

De acuerdo con el análisis de esta información, se definen 5 unidades hidrogeológicas, correspondientes a:

Depósitos Fluviales (Qf):

Corresponden a gravas y arenas asociadas al río Ramadillas. Presentan espesores de 36 y 46 m reconocidos en pozos WE-01 y WP-01. Permeabilidades registradas en el orden de 1 a 6 m/d y las transmisividades entre 75 y 480 m²/día. Los niveles se encuentran cercanos al nivel del río por lo que se supone una conexión río-acuífero.

Depósitos Aluviales (Qa):

Se encuentran en los cursos de las quebradas La Brea y otros afluentes de ésta. Corresponden principalmente a depósitos aluviales y en menor medida fluviales (antiguos y actuales) de variada composición granulométrica, que en algunos sectores se encuentran aterrizados y cortados por cauces fluviales actuales, especialmente en la confluencia con el río Ramadillas. Niveles de agua subterránea se encuentran en la mitad inferior de esta unidad. Los valores de permeabilidad en el orden de 10⁻³ a 10⁻¹ m/d (40 ensayos de permeabilidad).

Rocas Sedimentarias y Volcánicas Meteorizadas (RSVa):

Corresponden a rocas sedimentarias (principalmente areniscas y conglomerados) y volcánicas (lavas andesíticas) alteradas tanto por meteorización como por fracturamiento. En la mayoría de los sondeos esta unidad se encuentra saturada. Los valores de permeabilidad varían entre 10⁻³ y 10 m/d, cuyo rango se explica por la anisotropía de la litología y de la disminución de la permeabilidad en profundidad.

Rocas Sedimentarias y volcánicas frescas (RSVf):

Corresponden a las mismas rocas de la unidad anterior sin alteración o meteorización, por lo que sus características hidráulicas corresponden a acuitardos. Registran permeabilidades entre 10⁻³ y 10⁻¹ m/d.

Rocas Intrusivas (RI):

Agrupar a todas las rocas intrusivas con edades paleozoicas a cenozoicas. Aflora en la parte oriental del área estudiada y se encuentra muy cerca de la superficie en el sector norte. Las escasas pruebas indican una permeabilidad promedio de 6x10⁻³ m/d.

En la **Figura N°2.1** se observan estas unidades hidrogeológicas dispuestas en un mapa de la quebrada La Brea, específicamente en el sector del muro del depósito.

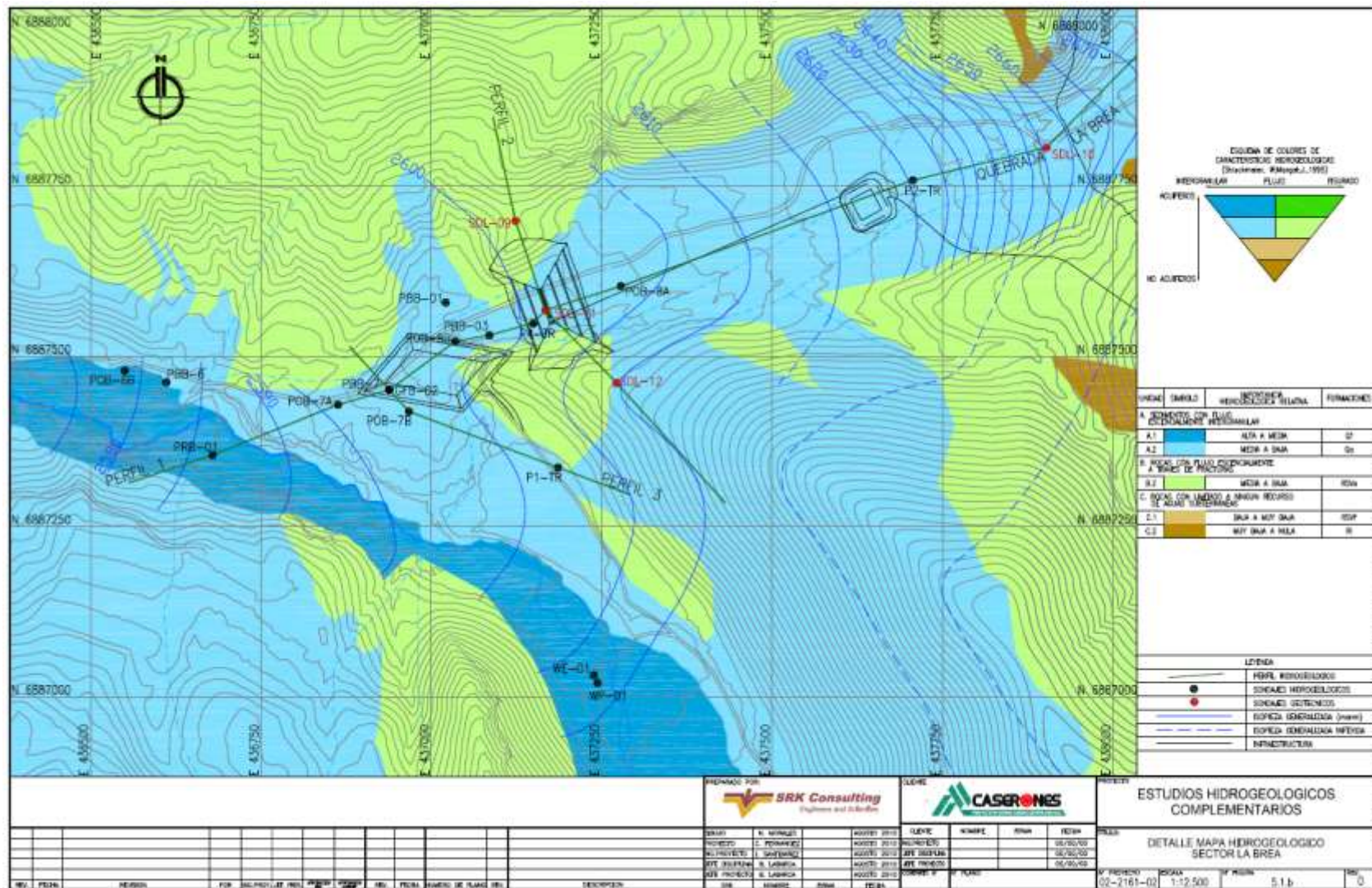


Figura N°2.1: Mapa hidrogeológico sector La Brea (SRK, 2011).

- Estudio Geofísico de Resistividad. Métodos Tomografía Eléctrica y Transiente Electromagnético NanoTem. Proyecto Caserones, Sector La Brea, Región de Atacama. Geodatos, Mayo 2015.

Este estudio geofísico comprende 13 perfiles ejecutados con el método de NanoTem y 6 perfiles de Tomografía Eléctrica. Dichos perfiles se distribuyen entre el muro del depósito de lamas y la confluencia de la quebrada La Brea con el río Ramadillas. En la **Figura N°2.2**, se muestra la ubicación de éstos.



Figura N°2.2: Ubicación de Perfiles Geofísicos realizados por Geodatos (2015).

Las secciones de resistividad NanoTEM y Tomografía Eléctrica muestran una estructura variable según su localización. En una parte central del área de estudio se aprecia un comportamiento relativamente estratificado, pero en general se observan fuertes variaciones laterales a lo largo de los perfiles. Esto indica que el área muestra características del tipo estructuras tridimensionales.

- Informes Técnicos Piezómetros y Pozos de Bombeo Quebrada La Brea. SRK, 2015.

Corresponden al informe técnico de la habilitación y estratigrafía de pozos construidos en el año 2015. Incluye fotografías de cutting, descripción de los terrenos perforados y una columna estratigráfica resumen de los multipiezómetros PZLB-1, PZLB-2, PZLB-3 y PZLB-4 y de los pozos

de bombeo PRLB-7, PRLB-8 y PRLB-9. La ubicación de estos sondajes se disponen en la **Figura N°2.3**.

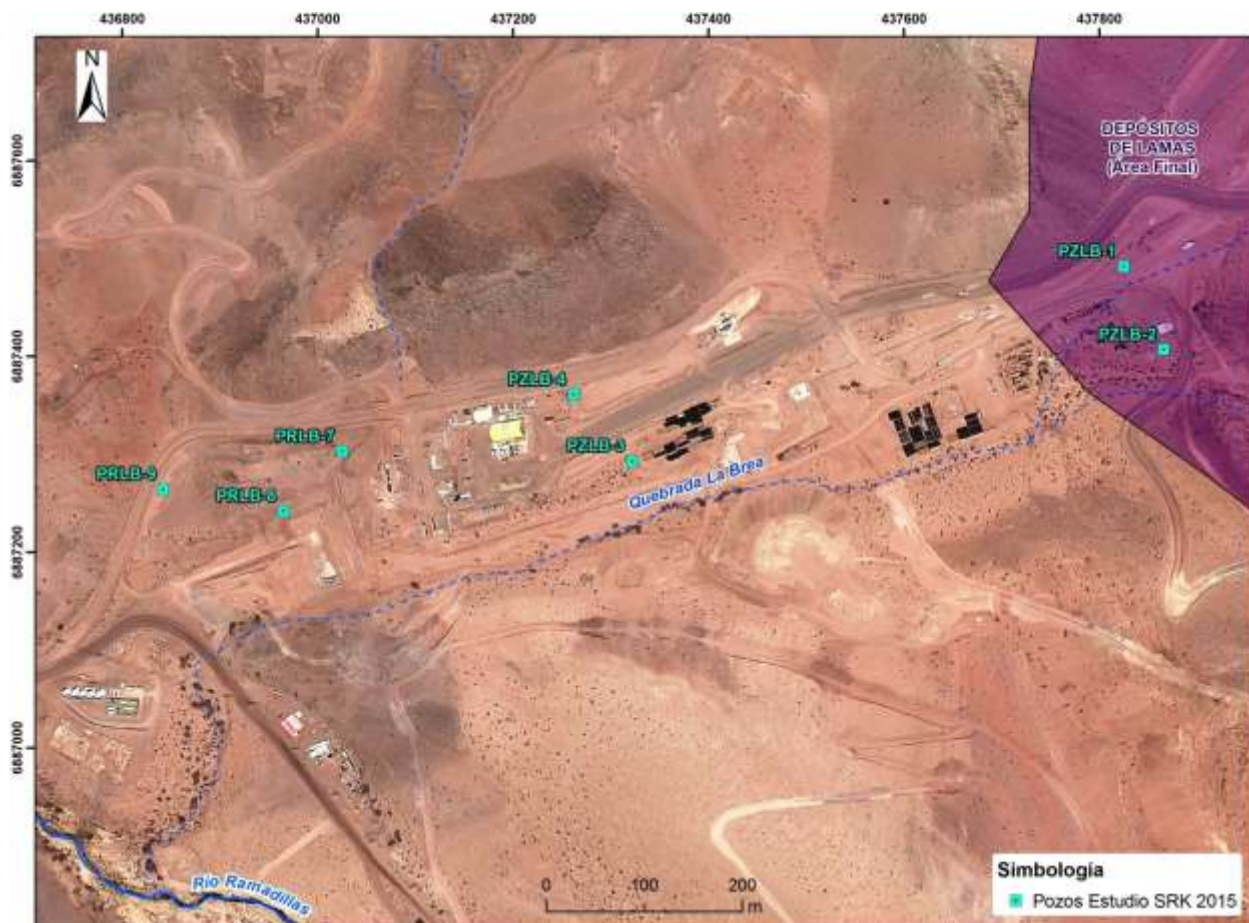


Figura N°2.3: Ubicación multipiezómetros y pozos de bombeo quebrada La Brea del estudio SRK, 2015.

◆ **Modelo Hidrogeológico La Brea.** Schlumberger, Agosto 2016.

Corresponde al informe del Modelo Conceptual y Numérico de flujo del sistema hidrogeológico La Brea. Se menciona la siguiente información recopilada (cabe señalar que esta información no se entrega en el Informe ni en Anexos):

- ✓ Información Estratigráfica de 52 pozos; Logueo de 25 sondajes geotécnicos.
- ✓ Habilitaciones de 102 pozos.
- ✓ Datos históricos de niveles estáticos y dinámicos.
- ✓ 20 pruebas de pruebas de bombeo.
- ✓ 58 ensayos tipo Lefranc y 47 ensayos tipo Lugeon.
- ✓ 4.284 análisis hidroquímicos de 91 puntos de muestreo subterráneo.
- ✓ 1.584 análisis hidroquímicos de 44 estaciones de aguas superficiales.
- ✓ Isótopos de 27 muestras de agua (5 de aguas superficiales, 18 de aguas subterráneas y 4 muestras de aguas de proceso).
- ✓ Estudios Geofísicos TEM, NanoTEM, refracción sísmica y resistividad de los años 2006, 2008, 2009, 2010 y 2015.

En base a esta información, definen el modelo conceptual del sistema hidrogeológico La Brea, identificando 3 unidades hidrogeológicas:

- (a) **Unidades hidrogeológicas de alta permeabilidad:** Conformados por sedimentos no consolidados (de tipo aluviales y coluviales) de permeabilidad primaria alta por porosidad del Cuaternario y constituyendo acuíferos libres.
- (b) **Unidades hidrogeológicas de baja permeabilidad:** Formaciones asociadas a los macizos rocosos fracturados de edad Mesozoica (Jurásico a Cretácico), los cuales presentan características hidrogeológicas variables en función de su composición mineralógica, granulométrica y grado de fracturación. Se distinguen 4 grandes conjuntos geológicos de comportamiento hidrogeológico diferenciable:
- ✓ Lavas andesíticas de la Formación La Ternera (Triásico): presentan una baja-media permeabilidad primaria, pero una mayor permeabilidad secundaria por fracturación. Este paquete tiene un espesor promedio de 100 m.
 - ✓ Conjunto multinivel del Miembro Inferior de la Fm. Lagunillas (Jurásico Medio-Superior): secuencia de areniscas y conglomerados en la base y lavas andesíticas con areniscas a techo, intercalando niveles de baja permeabilidad con niveles de mayor permeabilidad primaria y/o secundaria, ya que esta serie se encuentra fracturada y atravesada por diques intrusivos de edad reciente. Este conjunto presenta un espesor promedio de 500 m.
 - ✓ Conjunto multinivel del Miembro Superior de la Fm. Lagunillas (Jurásico Medio-Superior): corresponde con una secuencia de areniscas y conglomerados en la base y lavas andesíticas de comportamiento hidrogeológico similar al Miembro inferior, con una mayor potencia (850 m).
 - ✓ Conjunto Cretácico Superior: constituido por una potente serie (2.400 m) de volcanitas, volcanoclásticas e ignimbritas de diferentes comportamientos hidrogeológicos.
- (c) **Zócalo granítico o basamento cristalino de muy baja permeabilidad primaria:** Aflora en el sector Oriental de la zona de estudio. La permeabilidad de este macizo puede estar localmente incrementada por la presencia de estructuras (diacласas, diques y fracturas abiertas) y, superficialmente, por la existencia de una franja de meteorización (suelos arenosos). Esta franja meteorizada también puede existir bajo los niveles Mesozoicos suprayacentes al basamento cristalino (paleorelieves).

Antes del depósito de lamas La Brea, el nivel piezométrico se encontraba en el contacto de los sedimentos no consolidados con la roca, aproximadamente a los 30 m bnt. Una vez entrada en operación el depósito de lamas y asociado a las filtraciones, el nivel piezométrico asciende hasta los 18 m bnt, aproximadamente, saturando los depósitos no consolidados.

Asociado a estas filtraciones se registra un aumento de las concentraciones de sulfato en la unidad de sedimentos no consolidados de alta permeabilidad. Se han registrado concentraciones de hasta 1.530 mg/L en el piezómetro PBB-07 (ubicado 200 m aguas arriba de la confluencia de la quebrada La Brea con el río Ramadillas).

En los piezómetros que monitorean las rocas de baja permeabilidad y el zócalo granítico, se observa un ligero aumento en la concentración de sulfato en el sector más cercano al pie derecho del muro (pozos PZLB-01A y PZLB-01B). Sin embargo, no se registran indicios de las filtraciones en el resto de los piezómetros del sustrato rocoso (PZLB-02, situado al pie izquierdo del muro; y PZLB-03A y PZLB-04A, ubicados aguas abajo del muro).

♦ **Modelo de Simulación para Estimación de Infiltraciones Depósito de Lamas La Brea.**
Arcadis, Agosto 2016.

Corresponde al informe del modelo de simulación de las infiltraciones registradas en el depósito de lamas La Brea, desde el inicio de la operación hasta la actualidad. El dominio de modelación se define en la cota 3.000 m snm (por el Norte, Este y Sur) y cierra por el Oeste, en el sector entre la zanja cortafugas y los pozos de remediación.

Se recopilan los siguientes antecedentes:

- ✓ Geología superficial.
- ✓ Litología y habilitación de pozos y sondajes.
- ✓ Ensayos hidráulicos (Lugeon, Lefranc, pruebas de bombeo) en sondajes y pozos.
- ✓ Levantamientos geofísicos mediante MASW y sísmica de refracción, TEM, NanoTEM, tomografía eléctrica.
- ✓ Registros históricos de niveles, química de pozos, drenes, laguna de aguas claras.
- ✓ Información isotópica de aguas subterráneas.
- ✓ Niveles en piezómetros de cuerda vibrante.

A partir del análisis de estos datos desarrollan el modelo conceptual definiendo las siguientes unidades hidrogeológicas:

- (a) **Cuaternario:** En esta unidad se agrupan todos los depósitos no consolidados compuestos por gravas, arenas y finos en proporciones variables, con orígenes aluviales, fluviales y coluviales. La unidad presenta espesores variables que van desde unos pocos metros hasta los 45 metros en la confluencia con el río Ramadillas. Las pruebas de bombeo indican permeabilidades que superan los 15 m/d. Corresponde a la unidad de mayor relevancia hidrogeológica debido a su alta permeabilidad y continuidad en la quebrada La Brea. Si bien estos sedimentos fueron removidos en una parte importante debido a los trabajos de MLCC, aún se encuentran en ciertos sectores de la cubeta. Conforman el cerro Sin Nombre donde se apoya el muro en su mitad sur y se reconocen bajo el muro del depósito. Presentan espesores variables en todas las quebradas afluentes a La Brea. Originalmente el nivel freático se encontraba cercano al contacto entre estos depósitos y las unidades de roca subyacente, situación que ha sido modificada debido a las infiltraciones desde el depósito.
- (b) **Rocas indiferenciadas fracturadas/meteorizadas:** En esta unidad se agrupan las lavas triásicas, miembro sedimentario inferior y lavas de la Fm. Lagunillas, que tienen una mayor permeabilidad debido a fracturamiento, meteorización y/o alteración local, relativo a lo estimado para las rocas sanas. Se identifican aguas arriba del muro del depósito, en la ladera norte y en la parte central. Se estima una permeabilidad de hasta 5 m/d.
- (c) **Miembro sedimentario superior Fm. Lagunillas:** Conformado por areniscas rojas, las cuales se disponen de forma concordante sobre las lavas de la misma formación. Se ha reconocido de forma regional y no tiene mayor relevancia en la hidrogeología del sector debido a su ubicación en el extremo occidental de la quebrada y a su posición estratigráfica elevada. Dado su similitud litológica con el miembro sedimentario inferior de la Fm. Lagunillas se le otorgan permeabilidades entre 10^{-2} y 10^{-3} m/d.
- (d) **Lavas Formación Lagunillas:** Corresponden a las lavas que sobreyacen al miembro sedimentario de la Fm. Lagunillas, y que en general se encuentran competentes en superficie, con permeabilidades en los sondajes SDL-09, SDL-11, SDL12, entre 10^{-3} y 10^{-1} m/d.

- (e) **Miembro Sedimentario inferior Fm. Lagunillas:** En esta unidad se agrupan las areniscas basales y conglomerados superiores de la Fm. Lagunillas que afloran en la quebrada La Brea. Ensayos en los sondajes SDL-02, SBL-08, SDL09 y SDL-11 indican permeabilidades entre 10^{-3} y 10^{-2} m/d.
- (f) **Lavas Triásicas:** Corresponde a la Fm. La Ternera, incluyendo los miembros compuestos por brechas y lavas. No existen evidencias en subsuperficie sobre su continuidad hacia el oeste de la quebrada La Brea, aguas abajo del muro. Esta unidad podría encontrarse fracturada y/o alterada en el miembro compuesto por lavas y no así en el miembro brechoso. Esto se traduce en una baja permeabilidad en el sector de la laguna secundaria (Cantera-2), mientras que en el estribo derecho (norte) del depósito, tiene un mayor grado de alteración-meteorización que la hacen deleznable y con una mayor permeabilidad. Ensayos de Lugeon en los pozos SDL-04 y SDL-05 entregan rangos de permeabilidad entre 10^{-3} y 10^{-2} m/día para la roca sana.
- (g) **Basamento:** Esta unidad agrupa las rocas intrusivas de edades paleozoicas y más recientes. Aflora en la parte oriental de la zona de estudio y presenta cierto alzamiento en el sector de la quebrada La Brea, inmediatamente aguas abajo del depósito de lamas. Corresponde al basamento hidrogeológico de baja permeabilidad, en general sin alteración y fracturamiento. En base a información de ensayos hidráulicos y sus características litológicas se estimaron valores de permeabilidad entre 10^{-3} y 10^{-2} m/d para la roca fresca.

A partir de las simulaciones de flujo de aguas subterráneas desarrolladas para el año 2015 y parte del año 2016, se identifican 2 vías preferenciales de flujo, una asociada a las unidades de material aluvial y otra asociada a las rocas que subyacen bajo el depósito de lamas.

La principal vía de infiltración está conformada por los depósitos sedimentarios cuaternarios de origen aluvial y coluvial de la quebrada principal.

Al sur del depósito y cercano al cerro sin nombre entre la cubeta principal y la laguna secundaria también se identifican zonas aluviales (quebrada La Brea) en superficie en contacto con la laguna de aguas claras y con anomalías de baja resistividad. Esto, complementado con los aumentos de caudales en el dren aforador coincidentes con los aumentos de presión en piezómetros, indica que los depósitos aluviales en este sector también constituyen una vía preferencial para la infiltración. Esto toma relevancia posterior a Septiembre 2014 una vez que la laguna de aguas se apoya sobre la unidad sedimentaria, es decir, configura una segunda vía de infiltración.

Adicionalmente, verifican que la potencial vía secundaria de infiltración a través de rocas meteorizadas en el estribo norte, sería de menor importancia relativa en términos de caudales, respecto de las zonas asociadas a aluviales (vía principal) y que, además la infiltración generada ahí fluiría hacia esta vía principal, donde se ubican las medidas de control de filtraciones existentes, aguas abajo del muro: pozos PRLB, zanja corta fuga y pozos de remediación.

Los resultados obtenidos con este modelo muestran una buena concordancia con el caudal captado por los drenes del muro y un ajuste razonable de los niveles y gradientes hidráulicos entre la laguna de aguas claras y el primer pozo de observación disponible (PZLB-01C).

La estimación de infiltraciones lograda con el modelo numérico habla de un valor inicial de 92 L/s a Mayo 2014, el cual se incrementa a 120 L/s en Julio 2014 y posteriormente se incrementa nuevamente en Octubre 2014 a 148 L/s, producto del crecimiento de la laguna hacia el estribo izquierdo, donde

aún no se habían depositado lamas. Luego la estimación decrece progresivamente hasta alcanzar un valor de 100 L/s en Enero 2015, aumentando progresivamente hasta 145 L/s en Noviembre 2015 y terminando la simulación en 137 L/s en Febrero 2016.

2.2 CALIDAD DE AGUAS

Mediante Resolución Exenta N°064 del 07 de Marzo de 2014, la Comisión de Evaluación de la Región de Atacama, resolvió validar el Plan de Monitoreo Robusto de Recursos Hídricos del Titular SCM Minera Lumina Copper Chile (MLCC) en el marco de la RCA N°13/20 del proyecto denominado “Proyecto Caserones”, previa conformidad con las condiciones establecidas por la DGA a dicho programa de monitoreo.

Este Plan propuso evaluar la calidad química en la Quebrada La Brea mediante los pozos BRW-01 y BRW-02, más un pozo multinivel en el entorno.

Asimismo, los pozos BRW-01, BRW-02, PBB-01, POB-08B y POB-07A corresponden a pozos acondicionados para efectuar bombeo de remediación, en tanto que, los pozos PBB-07, POB-06B y WE-01, están diseñados para verificar la efectividad de las medidas de remediación (ubicados aguas abajo de los pozos de bombeo).

Las aguas superficiales son monitoreadas en las estaciones LM-10 y LM-27, junto con el monitoreo de los canales interceptores, ubicados perimetralmente al depósito.

A partir de estas obligaciones, MLCC ha construido una base de datos de calidad de aguas de los puntos de monitoreo de la quebrada La Brea, la cual se encuentra resumida en la **Tabla N°2.1**. La ubicación de los puntos citados se encuentra en la **Figura N°2.8**.

Tabla N°2.1: Información histórica de calidad de aguas en quebrada La Brea.

Código	Descripción	UTM WGS 84		Matriz	Período con Mediciones
		Este (m)	Norte (m)		
LM-29	Canal Interceptor, Depósito de Lamas	439.535	6.886.368	Ag. Sup	S/I (Seco)
LM-30	Canal Interceptor A-2, Depósito de Lamas	440.420	6.887.172	Ag. Sup	ago'13
LM-31	Canal Interceptor C, Depósito de Lamas	441.375	6.888.646	Ag. Sup	ene'13-feb'16
LM-32	Canal Interceptor, Depósito de Lamas	438.412	6.890.065	Ag. Sup	S/I (Seco)
LM-33	Canal Interceptor, Depósito de Lamas	439.489	6.889.935	Ag. Sup	S/I (Seco)
LM-34	Canal Interceptor, Depósito de Lamas	440.100	6.891.195	Ag. Sup	S/I (Seco)
LM-42	Qda. La Brea a. abajo Depósito Lastre	443.658	6.885.560	Ag. Sup	nov'15-feb'16
LM-51	Zanja Cortafuga Depósito Lastre	S/I	S/I	Ag. Sup	abr'15-feb'16
LM-56	Aguas Claras Depósito de Lamas	S/I	S/I	Ag. Dep. Lamas	jul'14-feb'16
LM-49	Zanja Corta Fuga Qda. La Brea	S/I	S/I	Ag. Dep. Lamas	nov'14-feb'16
PZB-01	Pozo qda. La Brea a. abajo Botadero Lastre, a. arriba Depósito de Lamas	441.370	6.888.653	Ag. Sub	dic'13-abr'14
MNB-04	Multipiezómetro Qda. La Brea a. arriba Depósito de Lamas	441.529	6.888.598	Ag. Sub	may'15-feb'16
PZL-01	Pozo Zanja Lastre, en Qda. Roco a. arriba Depósito de Lamas	443.670	6.885.545	Ag. Sub	dic'13-feb'16
MNL-03	Pozo Qda. Roco a. arriba de Depósito de Lamas	440.470	6.887.159	Ag. Sub	ago'15-feb'16
P2-TR	Pozo por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	437.519	6.887.376	Ag. Sub	S/I
POB-8A	Pozo por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	437.095	6.887.221	Ag. Sub	jul'14-feb'16
P4-TR	Pozo por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.965	6.887.173	Ag. Sub	nov'08-oct'11

MNB-05	Multipiezómetro por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.936	6.887.181	Ag. Sub	may'15-feb'16
BRW-01	Pozo bombeo adicional Qda. la Brea	436.879	6.887.200	Ag. Sub	ene'12-feb'16
BRW-02	Pozo bombeo adicional Qda. la Brea	436.919	6.887.167	Ag. Sub	ene'12-dic'14 ene'15-feb'16
PBB-01	Pozo de Remediación por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.825	6.887.204	Ag. Sub	ago'14-feb'16
PBB-03	Pozo por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.900	6.887.151	Ag. Sub	S/I
POB-8B	Pozo de Remediación por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.846	6.887.143	Ag. Sub	ago'14-feb'16
PBB-07	Pozo por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.751	6.887.069	Ag. Sub	abr'14-feb'16
POB-07B	Pozo por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.783	6.887.043	Ag. Sub	S/I
MNB-06	Multipiezómetro por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.734	6.887.044	Ag. Sub	may'15-feb'16
POB-07A	Pozo de Remediación por Qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.676	6.887.049	Ag. Sub	abr'14-ago'14 ene'15-feb'16
P1-TR	Pozo N°1 Tranque Relave	437.038	6.886.929	Ag. Sub	S/I
WE-01	Observación Aguas arriba Qda. La Brea en cuenca río Ramadillas	437.238	6.887.032	Ag. Sub	mar'07-feb'16
LM-10	Río Ramadillas, antes confluencia Qda. La Brea	437.059	6.886.630	Ag. Sup	oct'04-feb'16
POB-06B	Eficiencia Remediación	436.550	6.887.479	Ag. Sub	mar'11-feb'16
LM-27	Río Ramadillas, después confluencia Qda. La Brea	435.876	6.887.160	Ag. Sup	may'10-feb'16
WE-02	Análisis Eficiencia Remediación Depósito Lamas en cuenca río Ramadillas a. abajo Qda. La Brea y a. arriba R. Sanitario	433.216	6.889.545	Ag. Sub	may'07-feb'16

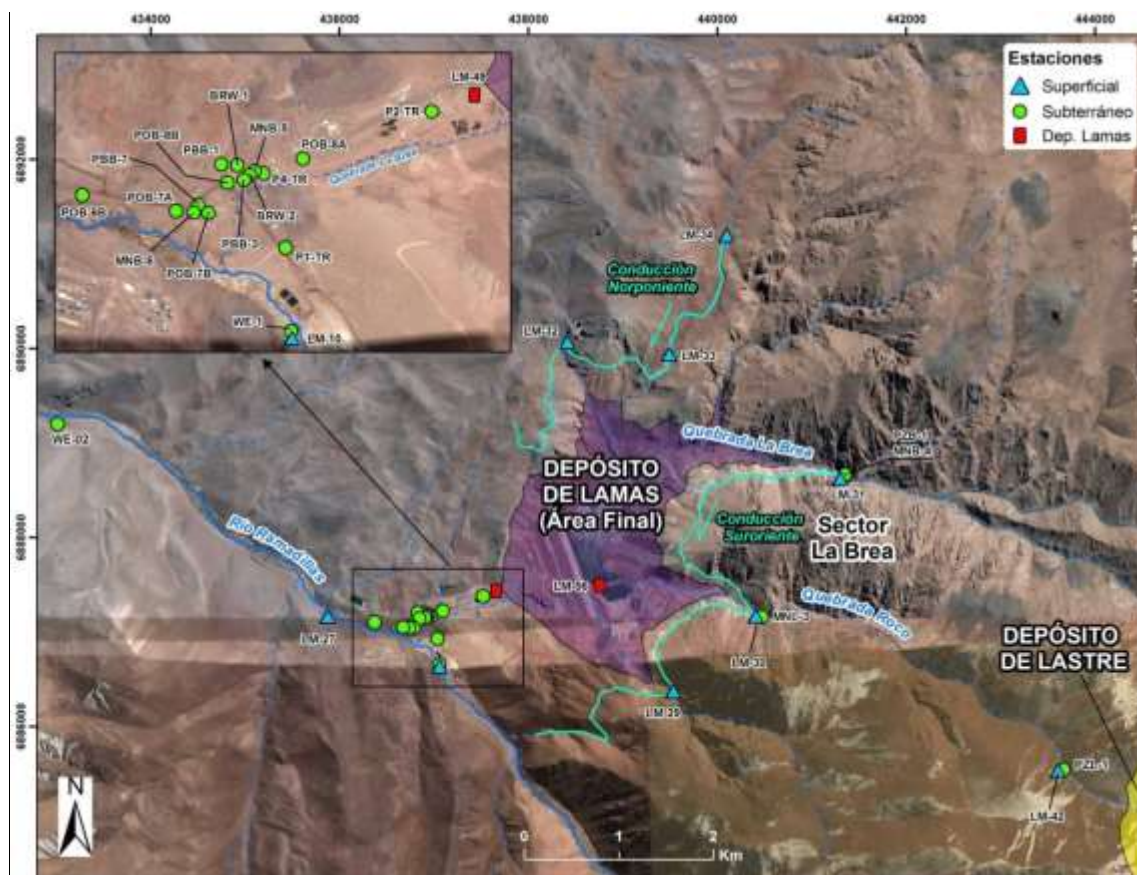


Figura N°2.8: Puntos de calidad de aguas monitoreados en quebrada La Brea.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 ACTIVIDADES DESARROLLADAS

En términos generales, el Plan de Monitoreo propuesto para el estudio "**Diferenciación de Aguas bajo Depósito de Lamas, Proyecto Caserones**", comprende el desarrollo de las siguientes actividades realizadas a través de dos campañas de monitoreo en Septiembre de 2015 y Febrero de 2016:

- (a) Medición de Nivel Freático y Caudales según sea el caso.
- (b) Filmación del estado de la captación, cuando sea posible.
- (c) Medición de la variación de C.E., Temperatura y pH en la columna de agua de los pozos (perfilajes), cuando sea posible.
- (d) Medición puntual de parámetros físicos-químicos *in situ* (C.E., Temperatura, pH y Oxígeno Disuelto).
- (e) Muestreo de agua a distintas profundidades en los puntos de monitoreo.
- (f) Mediciones de sulfato *in situ*.
- (g) Envío de las muestras de agua a laboratorios específicos para determinación de parámetros físico-químicos (pH, C.E., macroelementos, metales, etc.) e isotópicos (Deuterio y Oxígeno-18 del agua y, Azufre-34 y Oxígeno-18 del sulfato).
- (h) Recepción de resultados, control de calidad de los datos y confección de una base de datos depurada.
- (i) Comparación con data histórica en los puntos que coincidan con otros programas de monitoreo.
- (j) Análisis de los datos químicos e isotópicos.
- (k) Conclusiones.

3.2 PUNTOS DE MONITOREO

En el área de estudio se monitorearon en total **38 puntos** en la primera campaña y **47 puntos** en la segunda. Muchos de estos puntos pertenecen al monitoreo regular que efectúa MLCC en el área. La elección de estos puntos fue efectuada considerando su representatividad para caracterizar las aguas de la quebrada La Brea. En la segunda campaña también se agregaron puntos para visualizar el efecto que generan las aguas de la quebrada La Brea en el río Ramadillas.

Los puntos se ubicaron de acuerdo a distintos objetivos, que son:

- ♦ Monitoreo de aguas arriba del depósito (A.Arriba), en puntos ubicados en áreas sin influencia del depósito de lamas. Estos corresponden a las quebradas que confluyen a la quebrada La Brea aguas arriba del depósito y en el río Ramadillas aguas arriba de la quebrada La Brea (segunda campaña).
- ♦ Monitoreo de aguas del depósito de lamas (Fuente), que incluye las aguas claras y las aguas recuperadas en los drenes. En la segunda campaña, las aguas de la laguna “Cantera 2” también se consideraron dentro de este grupo, ya que estaban separadas de las aguas claras sólo por un prétil, presentando una calidad muy parecida. En esta campaña también se muestrearon lamas, a las cuales se les extrajo el agua luego de esperar que los sólidos decantaran.
- ♦ Monitoreo en sector de influencia correspondiente a la Zona de Recuperación (Inf-Rec), en puntos ubicados aguas abajo del depósito de lamas y aguas arriba de la zanja corta fuga (incluyéndola).
- ♦ Monitoreo en sector de influencia correspondiente a la Zona de Remediación (Inf-Rem), en puntos ubicados aguas abajo de la zanja corta fuga. En esta zona se incluye el muestreo de las vertientes más importantes que afloran en el sector de confluencia de la quebrada La Brea con el río Ramadillas.
- ♦ Monitoreo en sector de influencia del río Ramadillas, es decir aguas abajo de su confluencia con la quebrada La Brea (Inf-Ram), solamente en la segunda campaña de muestreo.

Cabe hacer notar que, todas las quebradas aguas arriba del depósito, que fueron monitoreadas, son interceptadas por los canales de contorno, los cuales dejan escurrir solamente la componente subterránea, que es la de mayor relevancia para el presente estudio, ya que es la que se mezclaría con las aguas del depósito de lamas.

Las matrices monitoreadas, en cada uno de los puntos de esta campaña, se clasifican en:

- ♦ Aguas superficiales (A. Sup)
- ♦ Aguas subterráneas (A. Sub)
- ♦ Aguas del depósito de lamas (A. Dep. Lamas), que incluye las aguas claras, las aguas recuperadas en los drenes, las aguas de la laguna Cantera-2 en la segunda campaña y las aguas sobrenadantes de las lamas obtenidas también en la segunda campaña.

Los tipos de análisis realizados en cada punto monitoreado, de no encontrarse seco o con poca agua como para muestrear, corresponden a Química e Isótopos.

Descartando los puntos que se encontraron sin agua (los mismos 6 en ambas campañas), en total se tomaron muestras en 32 puntos durante la primera campaña y en 41 puntos durante la segunda. Dentro de los 32 puntos de la primera campaña se encuentran seis pozos de monitoreo en los cuales se tomaron más de una muestra en cada uno, a distintas profundidades. Esto pozos son: PRLB-1 (2 muestras), PRLB-2 (2), PRLB-3 (3), PRLB-7 (3), PRLB-8 (3) y PBB-7 (2). Por otra parte, dentro de los 41 puntos de la segunda campaña, se encuentran dos pozos de monitoreo en los cuales se tomaron más de una muestra en cada uno, a distintas profundidades. Esto pozos son: PRLB-8 (2 muestras) y WE-2 (3 muestras). Este muestreo en profundidad se justifica

debido a que la habilitación (filmación) y las diferencias de conductividad eléctrica, pH y temperatura encontradas en los perfilajes químicos realizados, podrían estar señalando el ingreso de a lo menos, dos flujos con calidades diferentes entre sí. Por lo tanto, en total se tomaron **41 muestras** de agua en la primera campaña y **44 muestras** durante la segunda.

También, se incluyen dentro de estas muestras, los pozos de bombeo de la cortina hidráulica del depósito de lamas y la zanja corta fugas. Los pozos de recuperación (PRLB) se encontraban en etapa de construcción durante la primera campaña y por lo tanto no todos se pudieron muestrear en esta campaña. En la segunda pudieron muestrearse todos.

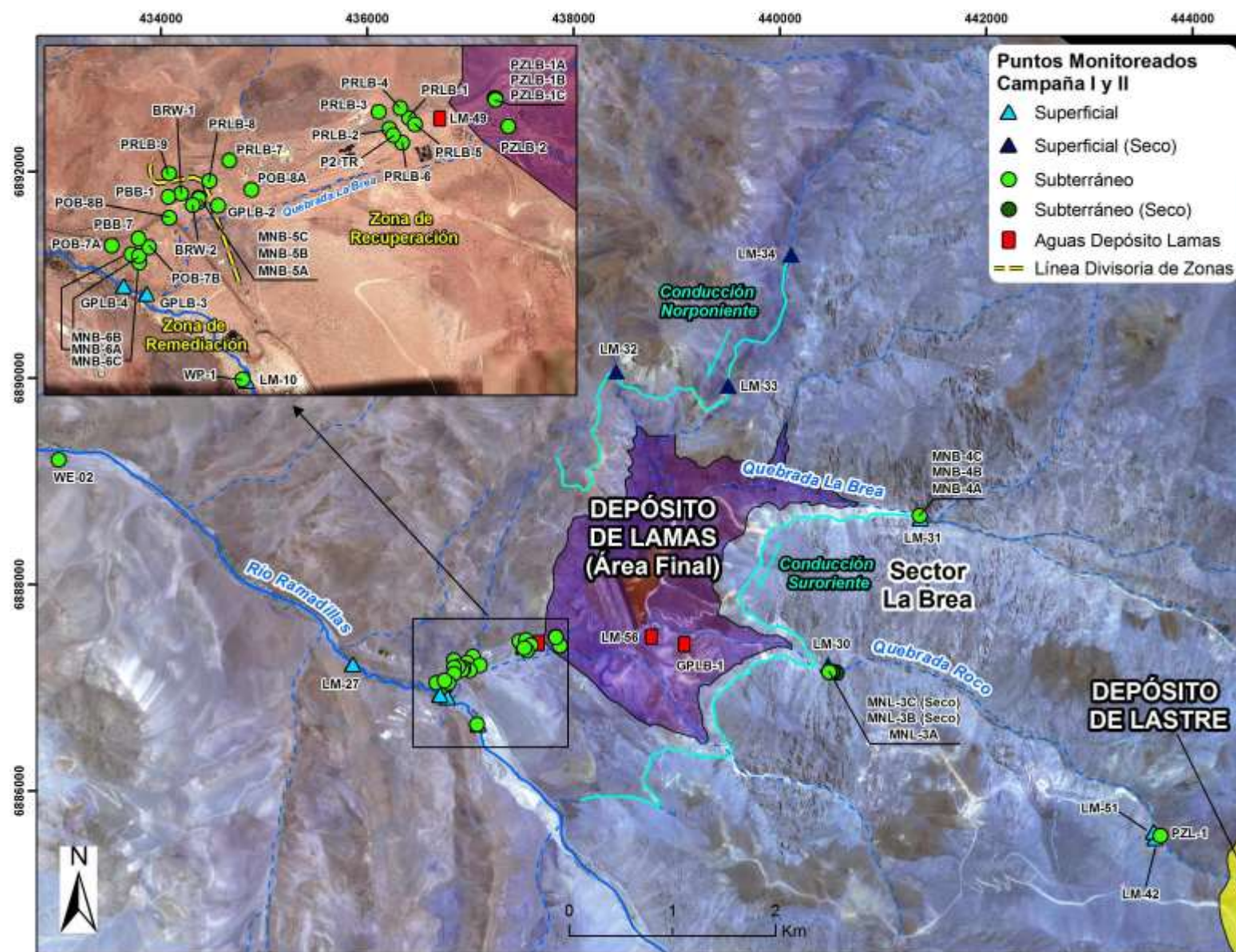
En la **Tabla N°3.1** se presentan los puntos de monitoreo de las dos campañas, junto con sus coordenadas, matriz monitoreada, objetivo y existencia de data histórica. De no encontrarse secos o con poca agua, los puntos visitados son muestreados (en algunos pozos en más de una profundidad), midiéndose en terreno los parámetros físico-químicos Temperatura, Conductividad, pH, Oxígeno Disuelto y Sulfatos, y enviadas las muestras para análisis de laboratorio químico e isotópico (aguas y sulfatos). La **Figura N°3.1** presenta un mapa con la distribución espacial de todos los puntos incluidos en el monitoreo.

Tabla N°3.1: Puntos de monitoreo campañas Sept-2015 y Feb-2016
para estudio "Diferenciación de Aguas bajo Depósito de Lamas, Proyecto Caserones".

ID Monitoreo	Descripción	Este (m)	Norte (m)	Matriz	Profundidad Captación (mbnb)	Objetivo	Monitoreo Histórico Caserones	Monitoreo Campaña	
								I	II
PZL-1	Pozo de monitoreo Zanja Lastre en quebrada Roco	443.654	6.885.551	Ag. Sub	S/I	A. Arriba	SI		X
LM-42 (Quebrada Roco)	Quebrada Roco en PZL-1	443.639	6.885.538	Ag. Sup	N/A	A. Arriba	SI		X
LM-51 (Zanja Roco)	Zanja Lastre en quebrada Roco	443.622	6.885.600	Ag. Sup	N/A	A. Arriba	SI		X
LM-31	Quebrada La Brea en bocatoma canal interceptor C	441.365	6.888.634	Ag. Sup	N/A	A. Arriba	SI	X	X
MNB-4A	Multipiezómetro qda. La Brea a. arriba Depósito de Lamas	441.353	6.888.666	Ag. Sub	28,3	A. Arriba	SI	X	X
MNB-4B	Multipiezómetro qda. La Brea a. arriba Depósito de Lamas	441.353	6.888.666	Ag. Sub	18,1	A. Arriba	SI	X	X
MNB-4C	Multipiezómetro qda. La Brea a. arriba Depósito de Lamas	441.353	6.888.666	Ag. Sub	10,2	A. Arriba	SI	X	X
LM-30	Quebrada Roco en bocatoma canal interceptor A-2	440.420	6.887.172	Ag. Sup (seco)	N/A	A. Arriba		X	X
MNL-3A	Multipiezómetro qda. Roco a. arriba de Depósito de Lamas	440.477	6.887.149	Ag. Sub	20	A. Arriba	SI	X	X
MNL-3B	Multipiezómetro qda. Roco a. arriba de Depósito de Lamas	440.479	6.887.150	Ag. Sub (poca agua)	S/I	A. Arriba		X	X
MNL-3C	Multipiezómetro qda. Roco a. arriba de Depósito de Lamas	440.484	6.887.148	Ag. Sub (poca agua)	S/I	A. Arriba		X	X
LM-34	Quebrada sin nombre en bocatoma canal interceptor	440.108	6.891.195	Ag. Sup (seco)	N/A	A. Arriba		X	X
LM-33	Quebrada sin nombre en bocatoma canal interceptor	439.499	6.889.927	Ag. Sup (seco)	N/A	A. Arriba		X	X
LM-32	Quebrada sin nombre en bocatoma canal interceptor	438.412	6.890.065	Ag. Sup (seco)	N/A	A. Arriba		X	X
GPLB-5	Aguas de transporte de las lamas	s/I	s/I	Ag. Dep. Lamas	Fuente	Fuente			X
GPLB-1	Laguna Cantera 2 en Cachimba (Campaña I) / en Balsa (Campaña II)	438.935 / 439.074	6.887.461 / 6.887.418	Ag. Sup / Ag. Dep. Lamas	N/A	A. Arriba / Fuente		X	X
LM-56	Aguas Claras Depósito de Lamas en pretil que lo une con Laguna Cantera 2 ⁽⁴⁾	438.790 / 438.755	6.887.613 / 6.887.492	Ag. Dep. Lamas	N/A	Fuente	SI	X	X
PZLB-2	Nuevo piezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	437.866	6.887.407	Ag. Sub	S/I	Inf-Rec		X	
PZLB-1A	Nuevo piezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	437.825	6.887.492	Ag. Sub	S/I	Inf-Rec		X	
PZLB-1B	Nuevo piezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	437.828	6.887.491	Ag. Sub	S/I	Inf-Rec		X	
PZLB-1C	Nuevo piezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	437.828	6.887.487	Ag. Sub	S/I	Inf-Rec		X	
LM-49	Salida de Drenes Depósito de Lamas	437.659	6.887.440	Ag. Dep. Lamas	N/A	Fuente	SI	X	X
PRLB-1	Nuevo Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.567	6.887.432	Ag. Sub	66,1	Inf-Rec	SI	X	X
PRLB-2	Nuevo Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.508	6.887.400	Ag. Sub	66,5	Inf-Rec	SI	X	X
PRLB-3	Nuevo Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.476	6.887.451	Ag. Sub	67,7	Inf-Rec	SI	X	X
PRLB-4	Nuevo Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.541	6.887.463	Ag. Sub	S/I	Inf-Rec	SI		X
PRLB-5	Nuevo Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.585	6.887.413	Ag. Sub	S/I	Inf-Rec	SI		X
PRLB-6	Nuevo Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.547	6.887.358	Ag. Sub	S/I	Inf-Rec	SI		X
P2-TR	Pozo por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	437.519	6.887.381	Ag. Sub	23,8	Inf-Rec			X
POB-8A	Pozo por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	437.091	6.887.216	Ag. Sub	71	Inf-Rec	SI	X	X
PRLB-7	Nuevo Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.025	6.887.303	Ag. Sub	126,2	Inf-Rec	SI	X	X
PRLB-8	Nuevo Pozo Cortina Hidráulica La Brea	436.965	6.887.242	Ag. Sub	106	Inf-Rec	SI	X	X
PRLB-9	Nuevo Pozo Cortina Hidráulica La Brea	436.842	6.887.264	Ag. Sub	98 ⁽³⁾	Inf-Rec	SI		X
GPLB-2	Zanja Corta Fuga Qda. La Brea	436.991	6.887.168	Ag. Sub-cortina	N/A	Inf-Rec		X	X
MNB-5A	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.932	6.887.178	Ag. Sub	64	Inf-Rem	SI	X	X

ID Monitoreo	Descripción	Este (m)	Norte (m)	Matriz	Profundidad Captación (mbnb)	Objetivo	Monitoreo Histórico Caserones	Monitoreo Campaña	
								I	II
MNB-5B	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.933	6.887.192	Ag. Sub	49,7	Inf-Rem	SI	X	X
MNB-5C	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.932	6.887.188	Ag. Sub	38,6	Inf-Rem	SI	X	X
BRW-2	Pozo bombeo adicional qda. la Brea a. debajo de Depósito de Lamas	436.915	6.887.170	Ag. Sub-cortina	85,3 ⁽²⁾	Inf-Rem	SI	X	X
BRW-1	Pozo bombeo adicional qda. la Brea a. debajo de Depósito de Lamas	436.879	6.887.204	Ag. Sub-cortina	83,3 ⁽²⁾	Inf-Rem	SI	X	X
PBB-1	Pozo de Remediación por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.841	6.887.195	Ag. Sub-cortina	54 ⁽²⁾	Inf-Rem	SI	X	X
POB-8B	Pozo de Remediación por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.843	6.887.132	Ag. Sub-cortina	56,7 ⁽²⁾	Inf-Rem	SI	X	X
POB-7B	Pozo por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.783	6.887.043	Ag. Sub	44	Inf-Rem	SI	X	
PBB-7	Pozo por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.751	6.887.069	Ag. Sub	55,4	Inf-Rem	SI	X	
MNB-6A	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.730	6.887.022	Ag. Sub	57,3	Inf-Rem	SI	X	X
MNB-6C⁽¹⁾	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.754	6.886.997	Ag. Sub	85,9	Inf-Rem	SI	X	X
MNB-6B⁽¹⁾	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.752	6.887.016	Ag. Sub	29,5	Inf-Rem	SI	X	X
POB-7A	Pozo de Remediación por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.671	6.887.048	Ag. Sub	71 ⁽²⁾	Inf-Rem	SI	X	X
GPLB-3	Vertientes La Brea aguas arriba Ramadillas	436.776	6.886.900	Ag. Sup	N/A	Inf-Rem			X
GPLB-4	Vertientes La Brea aguas arriba Ramadillas	436.706	6.886.924	Ag. Sup	N/A	Inf-Rem			X
LM-10	Río Ramadillas aguas arriba de confluencia con Qda. La Brea	437.077	6.886.639	Ag. Sup	N/A	A. Arriba	SI		X
WP-1	Pozo Bombeo Ramadillas Alto	437.064	6.886.644	Ag. Sub	S/I	A. Arriba	SI		X
LM-27	Río Ramadillas Aguas Abajo Confluencia Quebrada la Brea	435.860	6.887.223	Ag. Sup	N/A	Inf-Ram	SI		X
WE-2	(ex WE-RM-2) Pozo Exploración Ramadillas Medio	433.011	6.889.208	Ag. Sub	137.1	Inf-Ram	SI		X

- (1) Nombre según placa, aun cuando no coincide profundidad de la placa con profundidad medida.
- (2) Según informe de habilitación.
- (3) Metros bajo el nivel de terreno.
- (4) El lugar de muestreo en el depósito de lamas cambió debido al aumento del volumen del depósito.



3.3 METODOLOGÍA DE MUESTREO

Para efectuar el muestreo se utilizaron los procedimientos específicos de GP Consultores, los cuales varían dependiendo de la matriz de muestreo requerida; es decir, aguas superficiales, subterráneas o del depósito de lamas.

Las reglas generales para elegir un método de muestreo fueron las siguientes:

- Las **aguas superficiales** fueron muestreadas directamente con las botellas del laboratorio o, cuando no se pudo acceder al punto de muestreo, utilizando un recipiente de acero inoxidable conectado a un brazo telescópico.
- Este último método también se utilizó para las **aguas de proceso**, a excepción del punto GPLB-5, en donde se empleó un recipiente plástico de 20 L para muestrear las lamas.
- Los **pozos** con bomba instalada fueron muestreados a través de un despiche. Esto también aplicó para la zanja corta fugas.
- Los **pozos** sin bomba y con diámetro suficiente (mayor o igual a 4”) fueron muestreados con una bomba portátil.
- Para **pozos** con profundidades de muestreo superiores a 60 mbnb o pozos con exceso de sedimento o incrustación, se empleó una botella muestreadora vertical de doble tapa.
- Finalmente, en **pozos** con diámetro menor a 4” se utilizó una bomba manual Waterra para la extracción de la muestra.
- Excepcionalmente, para el muestreo del pozo PZL-1, se utilizó un bailer dedicado a este pozo.

La metodología usada para cada una de las muestras tomadas, según matriz de muestreo, se presenta en la **Tabla N°3.2**. La descripción de cada una de estas metodologías se encuentra en el **Anexo B**. Es importante destacar que en la mayoría de los casos en que se utilizó bomba para muestreo, se emplea el método de muestreo de bajo caudal (LFPS: “Low Flow Purging and Sampling”), el cual obtiene una muestra de agua representativa del acuífero a una profundidad determinada.

Para determinar la **profundidad de muestreo** en los pozos sin bomba dedicada, fueron realizadas dos actividades previas: Filmación y Perfilaje. La primera actividad es de carácter inspectiva y sirve para obtener información de la habilitación y de su estado actual. El perfilaje químico sirve para obtener una visión de la variación vertical de los parámetros físico-químicos (T°, CE y pH) y, por ende, identificar los probables ingresos de agua al pozo. Las profundidades de muestreo fueron seleccionadas dentro de los tramos cribados o ranurados del pozo, representando todos los cambios en la calidad de las aguas. Se destaca que en los multipiezómetros no se realizaron perfilajes pues la habilitación se encuentra acotada a tramos cortos, en donde se realizó el muestreo. Los pozos que fueron filmados en la primera campaña no fueron filmados nuevamente, utilizando la habilitación obtenida de la filmación previa. Los perfilajes en tanto, fueron repetidos en los casos en que se creyó que pudieron existir cambios.

Adicionalmente, se midió el **nivel estático** en los pozos de monitoreo y el **caudal extraído** en los pozos de bombeo. En las aguas superficiales se midió el **caudal** donde existía escurrimiento suficiente. También, en el lugar de muestreo se midieron los parámetros físico-químicos T°, CE, OD y pH. Los sulfatos fueron medidos en terreno con equipo portátil.

Un resumen de las actividades realizadas en cada punto (cantidad de muestras, mediciones físico-químicas, filmación, perfilaje y medición de caudal o nivel) se encuentran en la **Tabla N°3.3**.

En el **Anexo B** se describe el procedimiento para la preservación y envío de las muestras a los laboratorios correspondientes. En el caso de las muestras para análisis químico, éstas fueron enviadas a través de SITAC al laboratorio perteneciente al área de aguas y alimentos DICTUC. Las muestras para análisis de isótopos del agua y del azufre, fueron enviadas por GP al Laboratorio de Isótopos Ambientales de la Universidad de Waterloo, Canadá.

Tabla N°3.2: Metodología de muestreo de aguas.

ID Monitoreo	Matriz	Método de Muestreo de Aguas	Observaciones Relevantes
PZL-1	Ag. Sub	Muestreo con bailer dedicado a 10 mbnb	
LM-42 (QUEBRADA ROCO)	Ag. Sup	Directo desde cauce	
LM-51 (ZANJA ROCO)	Ag. Sup	Brazo Telescópico desde orilla	
LM-31	Ag. Sup	Brazo Telescópico desde orilla	
MNB-4A	Ag. Sub	C.I.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 25 mbnb C.II.: Botella Muestreadora Vertical a 25 mbnb	
MNB-4B	Ag. Sub	Botella Muestreadora Vertical a 14 mbnb	Mucho sedimento en paredes para bombear
MNB-4C	Ag. Sub	C.I.: Botella Muestreadora Vertical a 9 mbnb C.II.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 9 mbnb	Agua muy turbia para bombear
MNL-3A	Ag. Sub	Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 15,5 mbnb	
GPLB-5	A. Proceso	Muestreo con recipiente de 20 L desde Cajón 24. Se deja decantar y se llenan las botellas con el sobrenadante. Solamente para macroelementos e isótopos.	
GPLB-1	Ag. Sup / A. Proceso	Brazo Telescópico desde orilla	
LM-56	Ag. Dep. Lamas	Brazo Telescópico desde orilla	
PZLB-2	Ag. Sub	Watterra a los 38 mbnb luego de ambientar 15 minutos	
PZLB-1A	Ag. Sub	Watterra a los 31 mbnb luego de ambientar 15 minutos	Pozones con agua de sondaje cerca del pozo
PZLB-1B	Ag. Sub	Watterra a los 27 mbnb luego de ambientar 15 minutos	Pozones con agua de sondaje cerca del pozo
PZLB-1C	Ag. Sub	Watterra a los 15 mbnb luego de ambientar 15 minutos	Pozones con agua de sondaje cerca del pozo
LM-49	Ag. Dep. Lamas	Brazo Telescópico desde orilla, después que se juntan las tuberías	
PRLB-1	Ag. Sub	C.I.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 21 y 42 mbnb C.II.: Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
PRLB-2	Ag. Sub	C.I.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 26 y 49 mbnb C.II.: Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
PRLB-3	Ag. Sub	C.I.: Botella Muestreadora Vertical a 25 mbnb. Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 40 y 60 mbnb. C.II.: Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	Mucho sedimento en paredes para bombear
PRLB-4	Ag. Sub	Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
PRLB-5	Ag. Sub	Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
PRLB-6	Ag. Sub	Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
P2-TR	A. Sub	Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portatil instalada a 21 mbnb	
POB-8A	Ag. Sub	Botella Muestreadora Vertical a 34 mbnb	Paredes llenas de incrustaciones
PRLB-7	Ag. Sub	C.I.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 48 mbnb. Botella Muestreadora Vertical a 90 y 123 mbnb. C.II.: Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación.	Pozones con agua de sondaje cerca del pozo
PRLB-8	Ag. Sub	C.I.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 30 mbnb.	Pozones con agua de sondaje cerca del pozo

ID Monitoreo	Matriz	Método de Muestreo de Aguas	Observaciones Relevantes
		Botella Muestreadora Vertical a 70 y 85 mbnb.	
		C.II.: Botella Muestreadora Vertical a 43 y 87 mbnb.	Pozo previamente purgado.
PRLB-9	A. Sub	Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
GPLB-2	Ag. Sub	Despiche de bomba instalada luego de 15 min de ambientación	
MNB-5A	Ag. Sub	C.I.: Ambientación de 15 min con bomba portátil instalada a 56 mbnb	Se realiza posterior a purga realizada por INVEREX
		C.II.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 56 mbnb	
MNB-5B	Ag. Sub	C.I.: Ambientación de 15 min con bomba portátil instalada a 47 mbnb	Se realiza posterior a purga realizada por INVEREX
		C.II.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 47 mbnb	
MNB-5C	Ag. Sub	C.I.: Ambientación de 15 min con bomba portátil instalada a 30 mbnb	Se realiza posterior a purga realizada por INVEREX
		C.II.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 30 mbnb	
BRW-2	Ag. Sub	Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
BRW-1	Ag. Sub	Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
PBB-1	Ag. Sub	Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
POB-8B	Ag. Sub	Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
POB-7B	Ag. Sub	Botella Muestreadora Vertical a 35 mbnb	Paredes llenas de incrustaciones
PBB-7	Ag. Sub	Botella Muestreadora Vertical a 28 y 47 mbnb	Paredes llenas de incrustaciones
MNB-6A	Ag. Sub	C.I.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 55 mbnb	
		C.II.: Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 53 mbnb	
MNB-6C	Ag. Sub	Botella Muestreadora Vertical a 83 mbnb	Nombre según placa
MNB-6B	Ag. Sub	Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 22 mbnb	Nombre según placa
POB-7A	Ag. Sub	Despiche de bomba instalada luego de 3 min de ambientación	
GPLB-3	A. Sup	Directo desde cauce	
GPLB-4	A. Sup	Directo desde cauce	
LM-10	A. Sup	Brazo Telescópico desde orilla	
WP-1	A. Sub	Muestreo desde cachimba	
LM-27	A. Sup	Brazo Telescópico desde orilla	
WE-2	A. Sub	Botella Muestreadora Vertical a 29, 60 y 111 mbnb	Mucho sedimento en suspensión.

LFPS: “Low Flow Purging and Sampling” es el método de bajo caudal utilizado para muestrear.

C.I.: Metodología sólo utilizada en primera campaña.

C.II.: Metodología sólo utilizada en segunda campaña.

Tabla N°3.3: Tipos de monitoreo campañas Sept-2015 y Feb-2016 para estudio "Diferenciación de Aguas bajo Depósito de Lamas, Proyecto Caserones".

ID Monitoreo	Número de muestras		Filmación		Perfilajes OD, T, CE y pH		Nivel/Q	
	C.I	C.II	C.I	C.II	C.I	C.II	C.I	C.II
PZL-1		1						X
LM-42 (QUEBRADA ROCO)		1						X
LM-51 (ZANJA ROCO)		1						
LM-31	1	1					X	
MNB-4A	1	1	X				X	X
MNB-4B	1	1	X				X	X
MNB-4C	1	1	X				X	X
MNL-3A	1	1	X				X	X
GPLB-5		1						
GPLB-1	1	1						
LM-56	1	1						
PZLB-2	1						X	
PZLB-1	1						X	
PZLB-1B	1						X	
PZLB-1C	1						X	
LM-49	1	1					X	X
PRLB-1	2	1	X		X		X	X
PRLB-2	2	1	X		X		X	X
PRLB-3	3	1	X		X		X	X
PRLB-4		1						X
PRLB-5		1						X
PRLB-6		1						X
P2-TR		1		X		X		X
POB-8A	1	1	X		X		X	X
PRLB-7	3	1	X		X		X	X
PRLB-8	3	2	X		X	X	X	X
PRLB-9		1						X
GPLB-2	1	1						
MNB-5A	1	1	X				X	X
MNB-5B	1	1	X				X	X
MNB-5C	1	1	X				X	X
BRW-2	1	1					X	X
BRW-1	1	1					X	X
PBB-1	1	1					X	X
POB-8B	1	1					X	X
POB-7B	1		X		X		X	
PBB-7	2		X		X		X	
MNB-6A	1	1	X				X	X
MNB-6C	1	1	X				X	X
MNB-6B	1	1	X				X	X
POB-7A	1	1						X
GPLB-3		1						X
GPLB-4		1						X
LM-10		1						X
WP-1		1						
LM-27		1						X
WE-2		3		X		X		X
TOTALES	41	44	18	2	8	3	27	34

3.4 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

3.4.1 Análisis de Calidad de los Datos

El análisis de los iones mayores del agua permite verificar el balance iónico del agua. GP utiliza como criterio para la validación de resultados químicos enviados a laboratorios externos, el “Error en el Balance Iónico”, cuya ecuación se presenta a continuación:

$$ErrorBI(\%) = 100 \times \frac{\sum Cationes (meq/l) - \sum Aniones (meq/l)}{\sum Cationes (meq/l) + \sum Aniones (meq/l)}$$

Considerando que el agua debe estar eléctricamente neutra, el error máximo admitido es de 10%. Esa verificación no toma en cuenta la calidad del análisis específico de cada ión, pero da una idea global de la calidad general del análisis de la muestra. Cabe tener presente que la presencia de sedimentos en la muestras de agua no siempre permite este método de verificación.

Otros métodos que utiliza GP para verificar la calidad de los resultados de laboratorio son:

- 1) Comparación de parámetros de terreno con mediciones de laboratorio (CE, pH, SO₄)
- 2) Comparación de alcalinidad de laboratorio con la calculada
- 3) Presencia de carbonatos según pH
- 4) Cumplimiento de relaciones típicas de K-Na, Mg-Ca, Na-Cl

3.4.2 Hidroquímica

La proporción que existe entre las concentraciones de los macroelementos (Aniones HCO₃, CO₃, SO₄ y Cl. Cationes Ca, Mg, Na y K) permite determinar **la marca química del agua**, la cual se encuentra relacionada con el origen del agua y su evolución en el medio geológico. Específicamente, se usan diagramas para la comparación de los resultados; en este estudio se consideran:

- ◆ Diagramas de **Piper** (ver **Figura N°3.2**):
El diagrama de Piper permite la identificación de tendencias y de mezclas entre las muestras analizadas.
- ◆ Diagrama de **Stiff** (ver **Figura N°3.3**):
El diagrama de Stiff ilustra cada tipo de agua con una forma geométrica diferente. Es entonces útil para la identificación de tipos de aguas radicalmente diferentes. Además, el tamaño del diagrama indica la concentración de cationes y aniones de la muestra.

La química del agua es definida por las interacciones con el tipo de roca presente en el subsuelo, por interacción entre aguas superficiales y subterráneas, y por mezclas con aguas del depósito de lamas. Se espera entonces poder diferenciar los diferentes tipos de agua presentes en el sistema, basándose en la marca química. Esa información es complementada con los datos isotópicos.

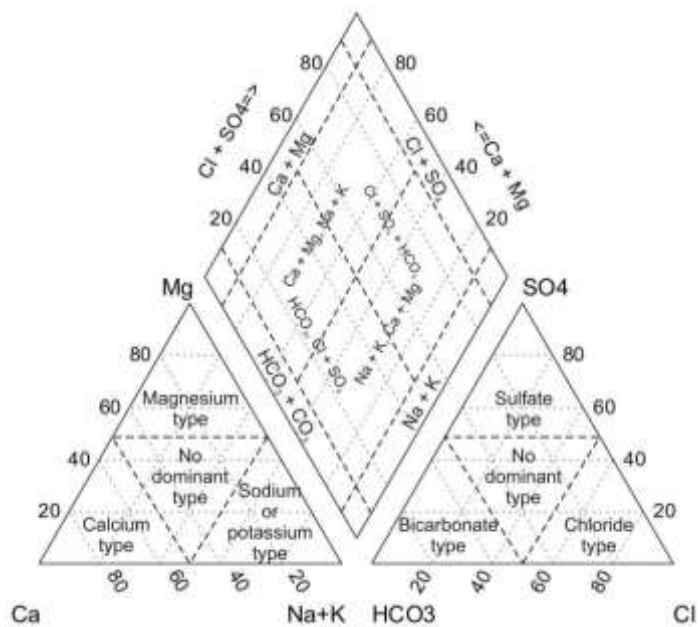


Figura N°3.2: Diagrama de Piper con delimitaciones de los diferentes tipos de agua (a partir de Fetter, 2000).

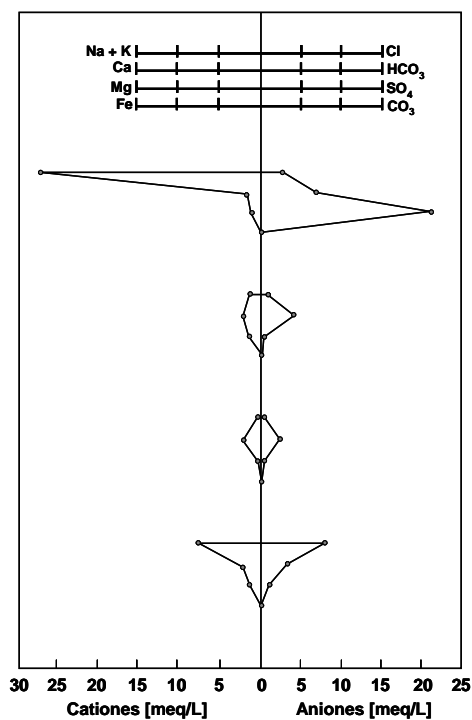


Figura N°3.3: Ejemplo de un diagrama de Stiff con representación de cuatro muestras.

3.4.3 Isótopos

(a) Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) y Deuterio ($\delta^2\text{H}$) del Agua

Los trazadores naturales más utilizados en hidrología subterránea corresponden a los isótopos estables del Oxígeno, denominado Oxígeno-18 [$\delta^{18}\text{O}$], y del Hidrógeno, denominado Deuterio [$\delta^2\text{H}$] (Clark y Fritz, 1997).

El contenido de dichos isótopos en la precipitación es función de la historia de las masas de aire y del proceso de fraccionamiento isotópico que ocurre durante la condensación del vapor de agua en el proceso de precipitación. Luego, cuando el agua pierde contacto con la atmósfera, los valores de los isótopos se mantienen constantes durante el recorrido del agua por la zona saturada del sistema acuífero. El contenido isotópico del agua subterránea representa el promedio ponderado de la composición isotópica de la precipitación que recarga al acuífero (que toma en cuenta la cantidad de precipitación). De esta forma, el contenido de los isótopos refleja las características del agua en la zona de recarga del sistema acuífero.

Los datos isotópicos se reportan en unidades de δ por mil, las cuales que se definen como:

$$\delta = [(R_m - R_{\text{est}}) / R_{\text{est}}] \cdot 1000$$

Donde,

R_m y R_{est} , es la razón isotópica del isótopo más pesado con respecto al más liviano ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$; $^2\text{H}/^1\text{H}$) de la muestra y del estándar, respectivamente. Los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ se reportan con respecto al estándar internacional VSMOW (Vienna Sea Mean Ocean Water).

Los principales factores involucrados en la variación de la concentración de los isótopos ambientales estables en la precipitación son: continentalidad y altitud. El otro fenómeno que puede afectar la composición isotópica de aguas superficiales es el proceso de evaporación.

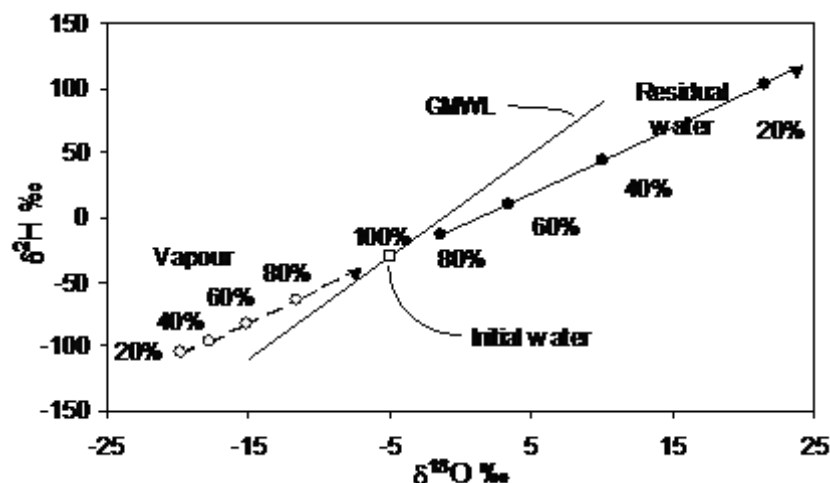


Figura N°3.4: Línea Meteorológica Mundial (GMWL) y efecto de la evaporación en la composición Isotópica (Clark y Fritz, 1997).

(b) Azufre-34 ($\delta^{34}\text{S}$) y Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) de los Sulfatos

Los isótopos de Azufre (S) son muy útiles para diferenciar el origen de los sulfatos (SO_4^{2-}) y los procesos que afectan a la concentración de sulfatos en aguas subterráneas (Clark y Fritz, 1997).

Hay diversos isótopos estables del azufre, pero en general sólo se utiliza el ^{32}S y el ^{34}S , debido a que son los más abundantes. El rango de valores de $\delta^{34}\text{S}$ en la naturaleza varía entre -50‰ y +50‰ (ver **Figura N°3.5**).

Los isótopos de Azufre no son tan conservativos como los de Oxígeno e Hidrógeno; ya que ellos pueden ser afectados por procesos de óxido-reducción en el subsuelo, específicamente por reducción de sulfatos, pero en general pueden ser usados para la evaluación de fuentes de sulfatos en aguas subterráneas que están en condiciones aeróbicas (Aravena y Mayer, 2009).

El estándar usado para cuantificar el contenido de isótopos de azufre es la Triolita del meteorito de hierro del Cañón del Diablo (CDT). En base a ese estándar, el contenido de $\delta^{34}\text{S}$ (en ‰) en una muestra es determinado de acuerdo a la siguiente relación:

$$\delta^{34}\text{S} = \left[\frac{\left(\frac{^{34}\text{S}}{^{32}\text{S}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{34}\text{S}}{^{32}\text{S}} \right)_{\text{CDT}}} - 1 \right] \cdot 10^3$$

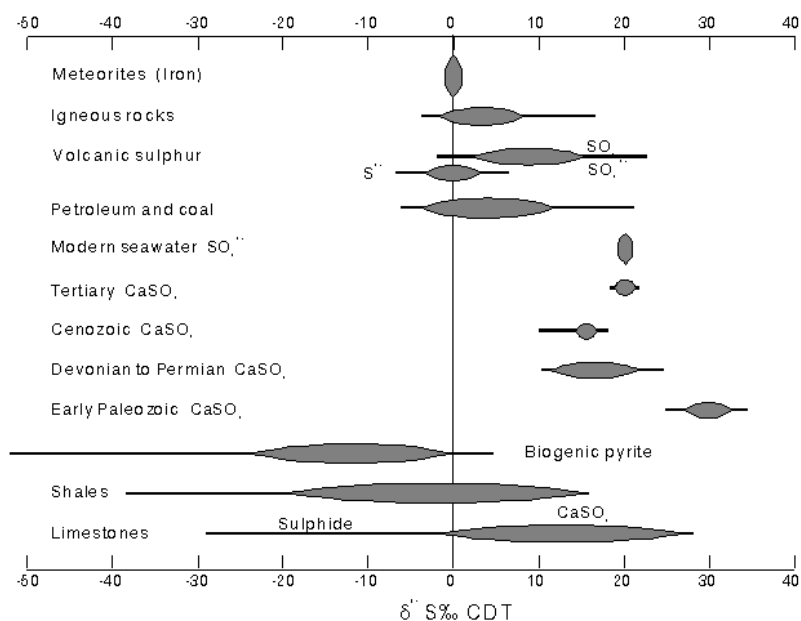


Figura N°3.5: Contenido del isótopo $\delta^{34}\text{S}$ en diferentes tipos de formaciones geológicas (Clark y Fritz, 1997).

En el presente estudio se analizan los isótopos del Azufre en los sulfatos para diferenciar las distintas fuentes potenciales de sulfatos en el sistema. Se espera que sirvan como trazador para diferenciar los sulfatos provenientes de las aguas de las lamas, de aquellos provenientes de fuentes naturales del sistema. También el Oxígeno-18 presente en los sulfatos puede ser útil ya que define el tipo de Oxígeno del agua que oxidó el sulfuro.

4. RESULTADOS

4.1 MEDICIONES DE TERRENO

De acuerdo a la metodología planteada, las mediciones realizadas en terreno se pueden agrupar de la siguiente forma:

Filmación de las Captaciones: Se realizaron filmaciones en los pozos donde fue factible introducir la cámara filmadora (diámetro mayor o igual a 4”). El equipo utilizado correspondió a una cámara modelo Econo Heavy Duty, marca Geovision, con la cual fue posible ver el estado de las tuberías, ranuras y cribas. También fue posible determinar el fondo de la captación y la turbiedad existente en el agua. Adicionalmente, se tomaron medidas físicas de diámetro de la captación y altura de brocal.

Perfilajes Físico-Químicos de las Aguas en los Pozos: Los perfilajes fueron realizados *in-situ* con el equipo multiparamétrico Troll 9500 marca In-Situ. Este equipo cuenta con sensores de conductividad eléctrica, temperatura y pH, junto con un transductor de presión para determinar la profundidad de las mediciones. Durante la segunda campaña de monitoreo fue utilizado un equipo multiparamétrico Aquatroll 200 marca In-Situ, que permite medir conductividad eléctrica, temperatura y profundidad.

Medición Puntual de Parámetros Físicoquímicos en Terreno: Las dos actividades anteriores permitieron elegir los puntos de muestreo. Luego de tomada cada muestra, los parámetros físico-químicos fueron medidos en terreno (T°, CE, OD y pH), con un multiparámetro marca WTW, modelo 197i. Según cada caso, se aforó el caudal con un molinete (pigmeo Gurley 625-A y Gurley 622), en el caso de aguas superficiales, o se midió el nivel freático con un pozómetro (marca Solinst), en el caso de aguas subterráneas. El análisis *in-situ* de la concentración de sulfatos se realizó con un fotómetro portátil (Merck NOVA 60).

En el **Anexo A** se presentan las dimensiones externas y la descripción detallada de las habilitaciones encontradas en los pozos. Se destaca las malas condiciones de muchos pozos de monitoreo, en donde existen importantes incrustaciones que en algunos casos tapan completamente las cribas o ranurados. Esto es particularmente importante en los pozos P2-TR POB-8A, POB-7B y PBB-7 y WE-2, los cuales tiene sus cribas llenas de incrustaciones.

Tanto el perfilaje como la filmación fueron utilizados para determinar la(s) profundidad(es) de muestreo, las cuales se grafican, para cada una de las 2 campañas, en las **Figuras N°4.1 a N°4.14**.

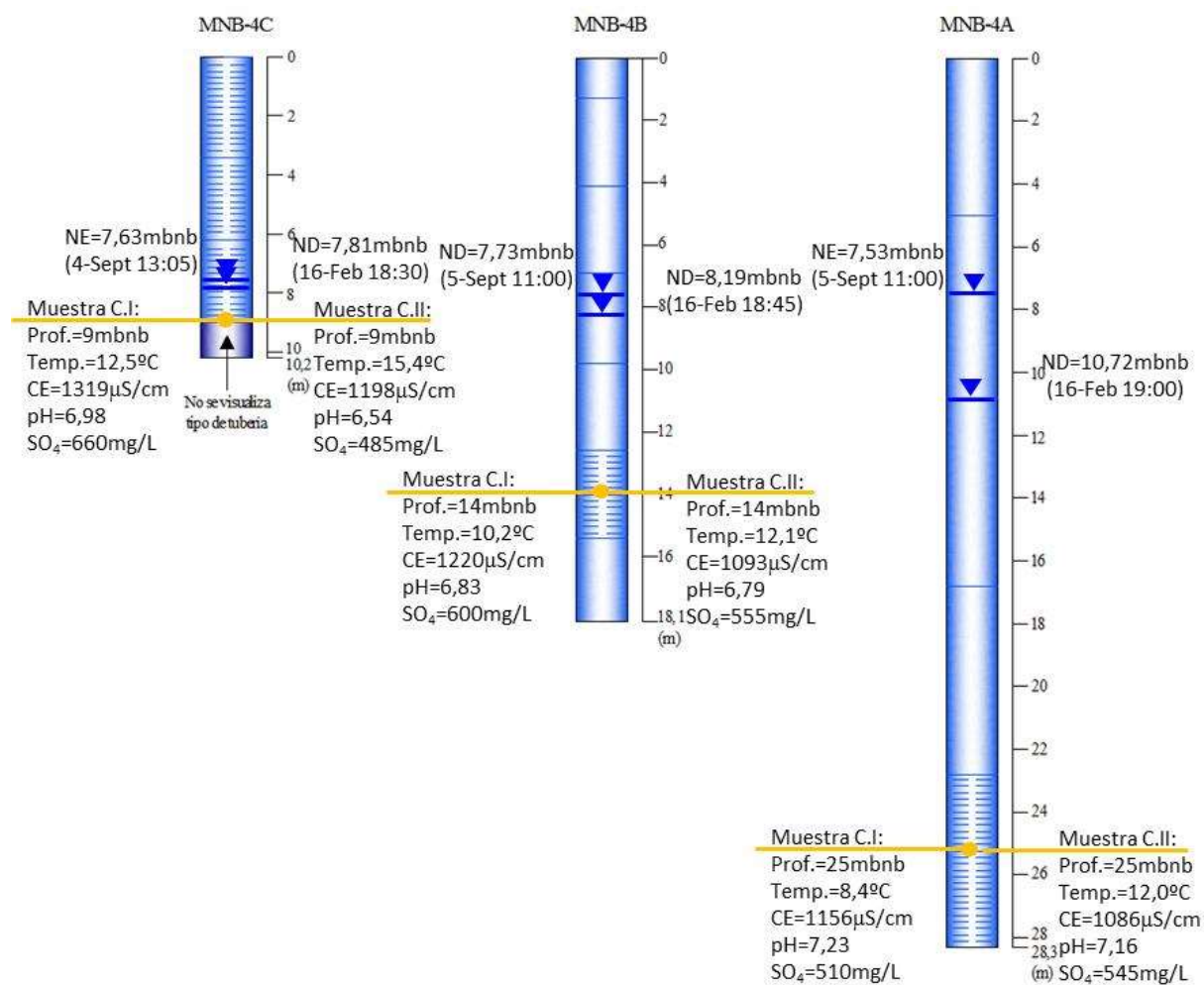


Figura 4.1: Habilitación y puntos de muestreo en pozo multinivel MNB-4 Campañas I y II.

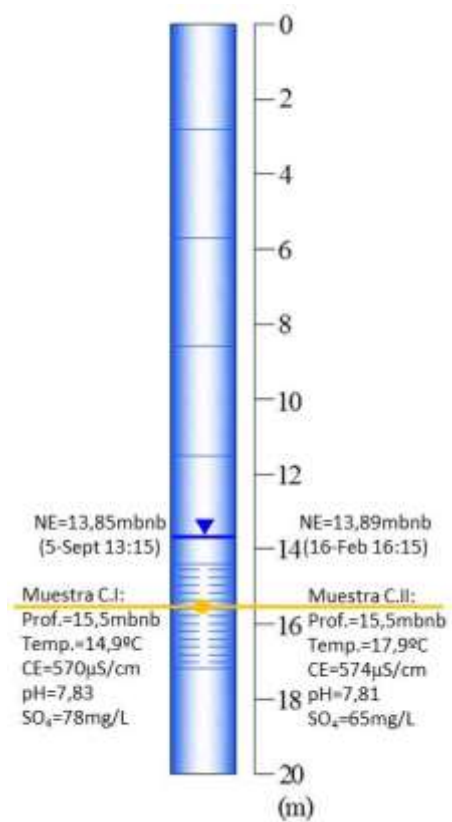


Figura 4.2: Habilitación y puntos de muestreo en **pozo multinivel MNL-3A** Campañas I y II.

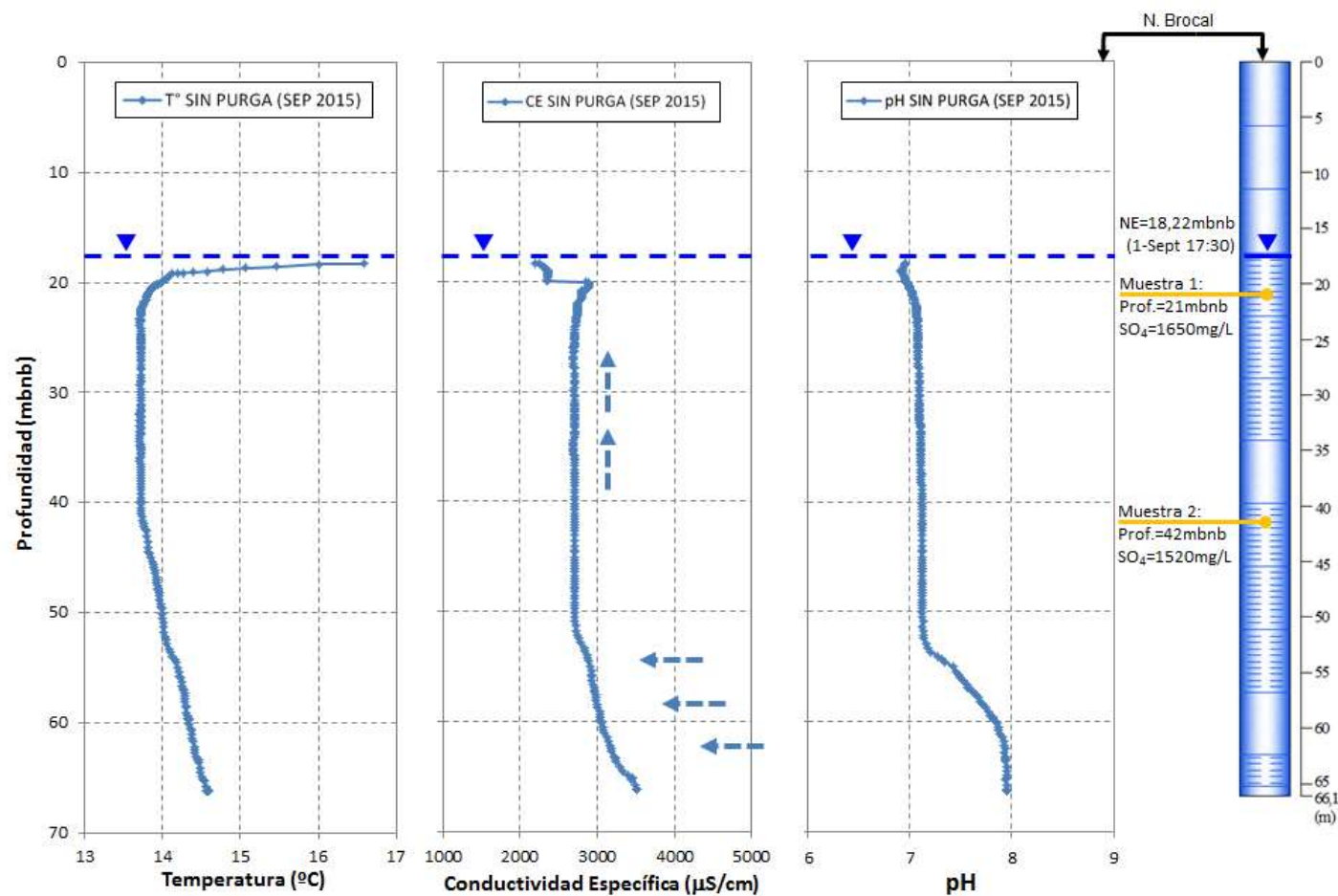


Figura 4.3: Perfilajes físico-químicos, habilitación y puntos de muestreo en **pozo PRLB-1** Campaña I.

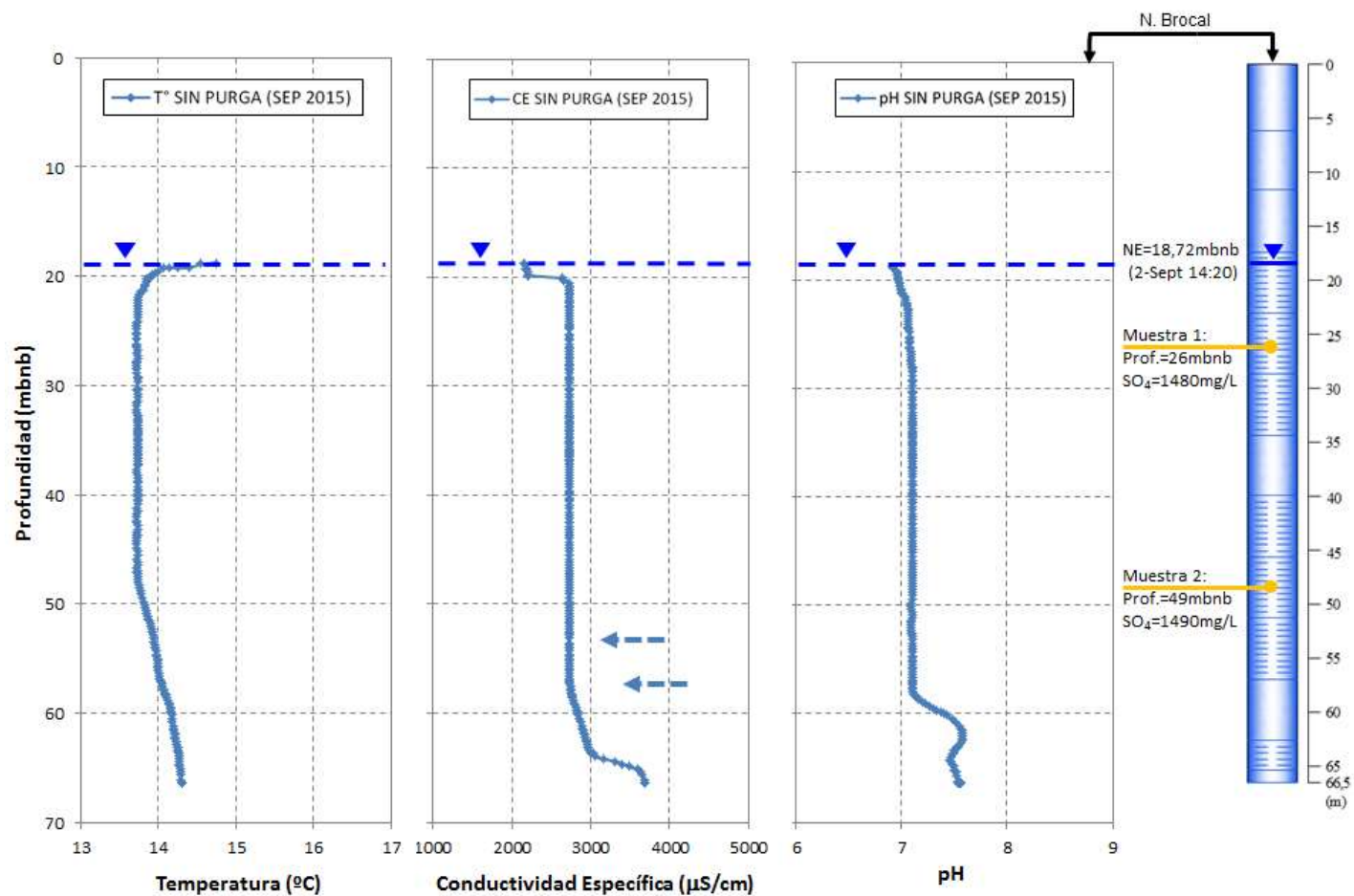


Figura 4.4: Perfilajes físico-químicos, habilitación y puntos de muestreo en **pozo PRLB-2** Campaña I.

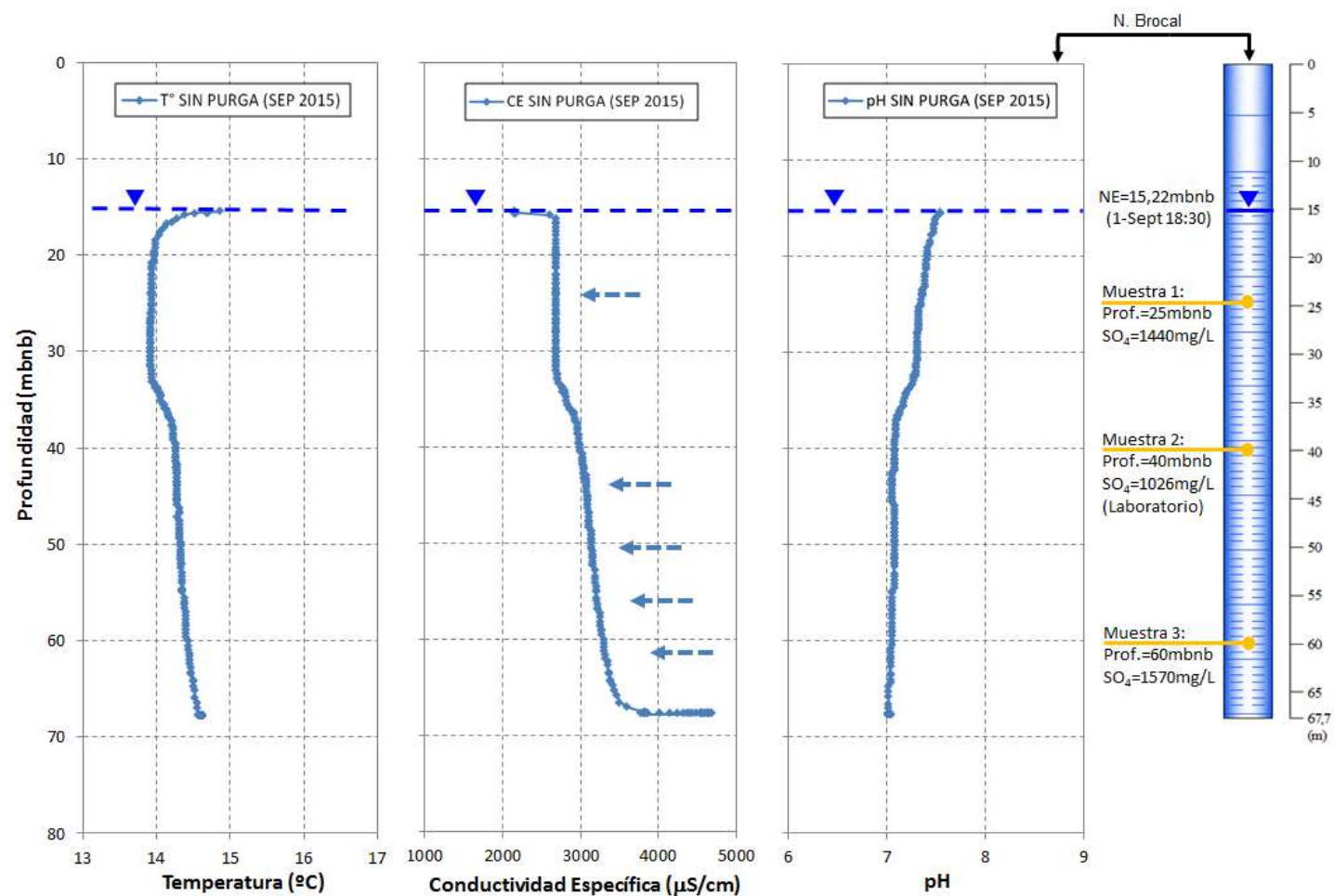


Figura 4.5: Perfilajes físico-químicos, habilitación y puntos de muestreo en **pozo PRLB-3** Campaña I.

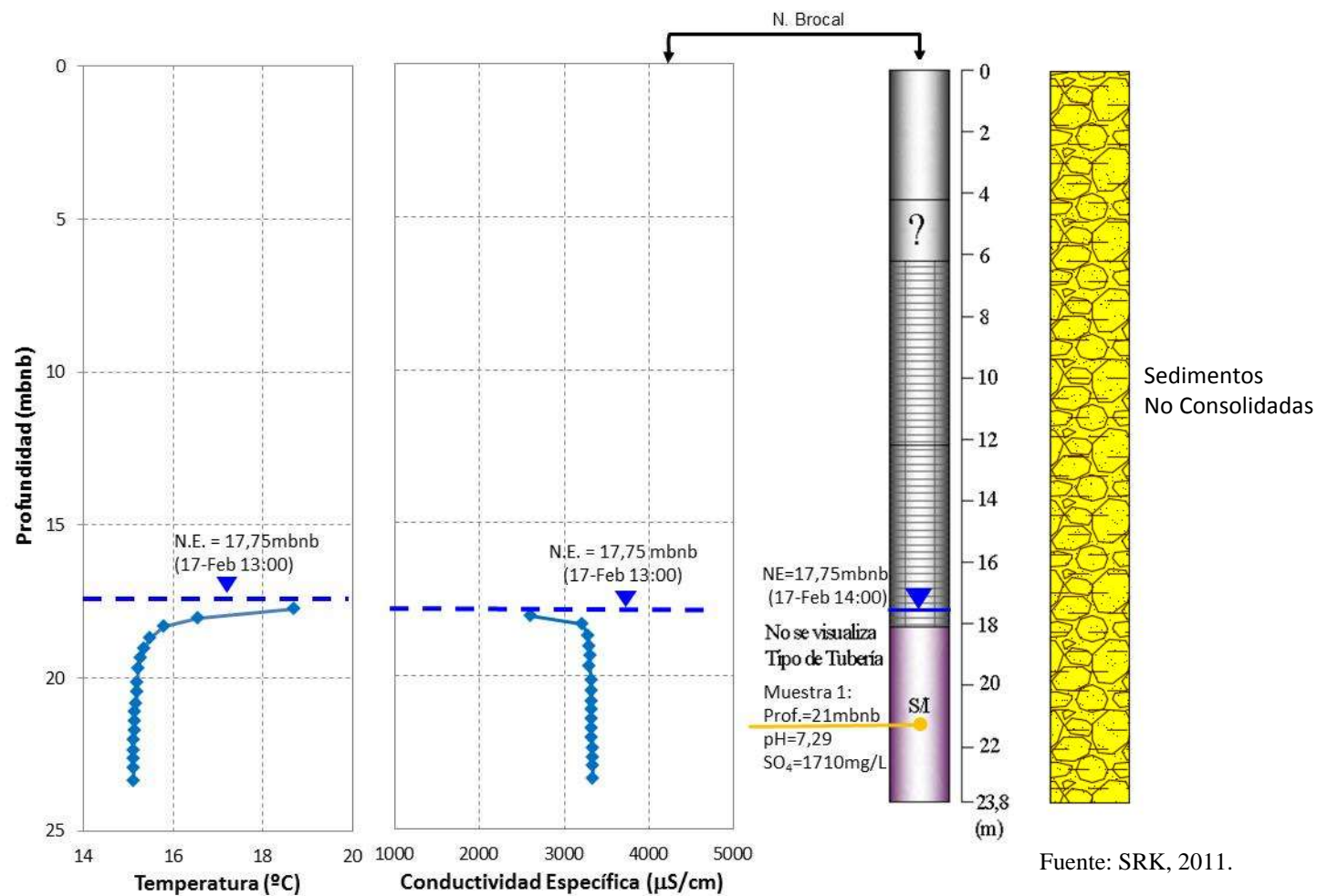


Figura 4.6: Perfilajes físico-químicos, habilitación y puntos de muestreo en **pozo P2-TR** Campaña II.

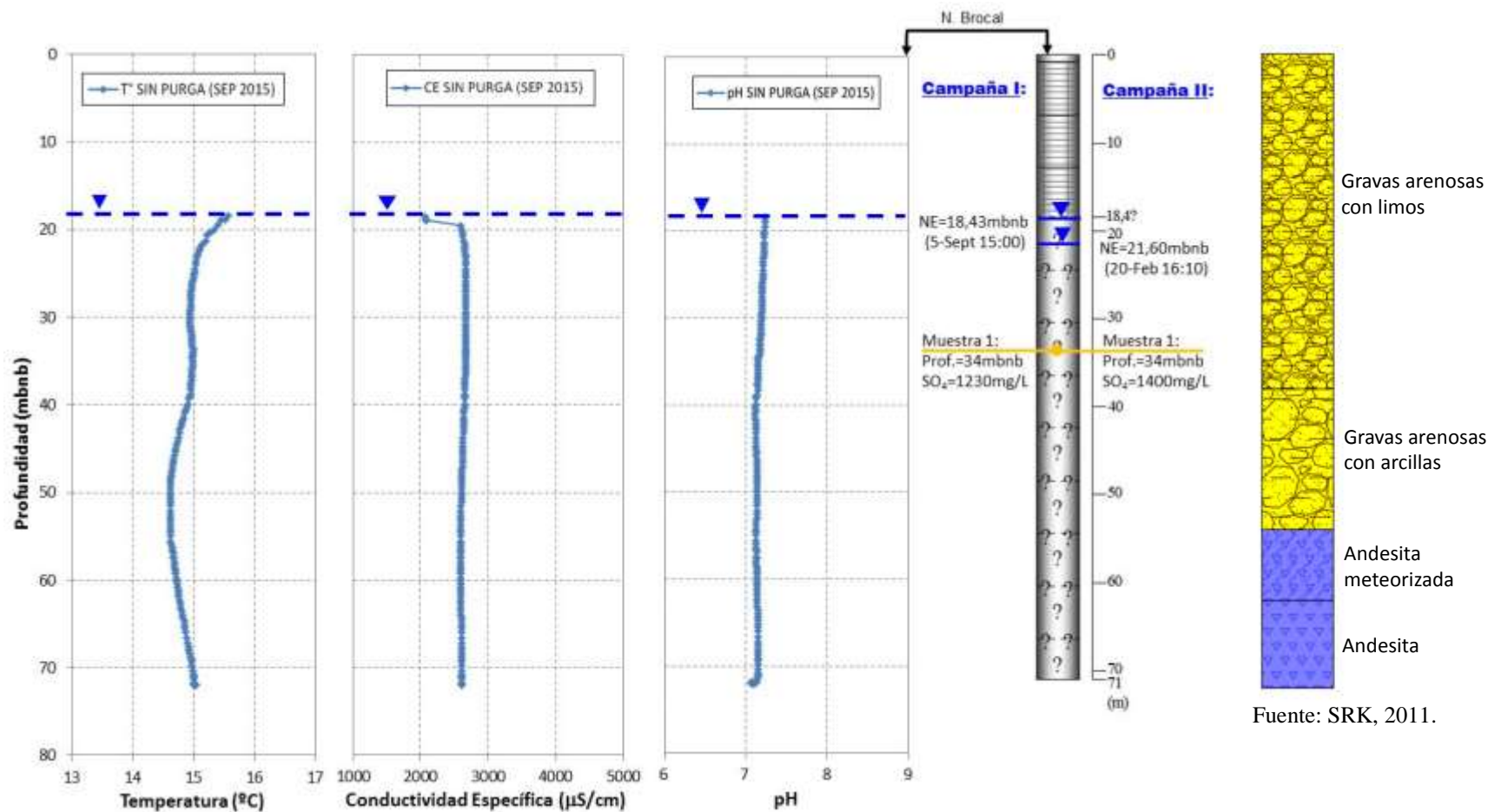
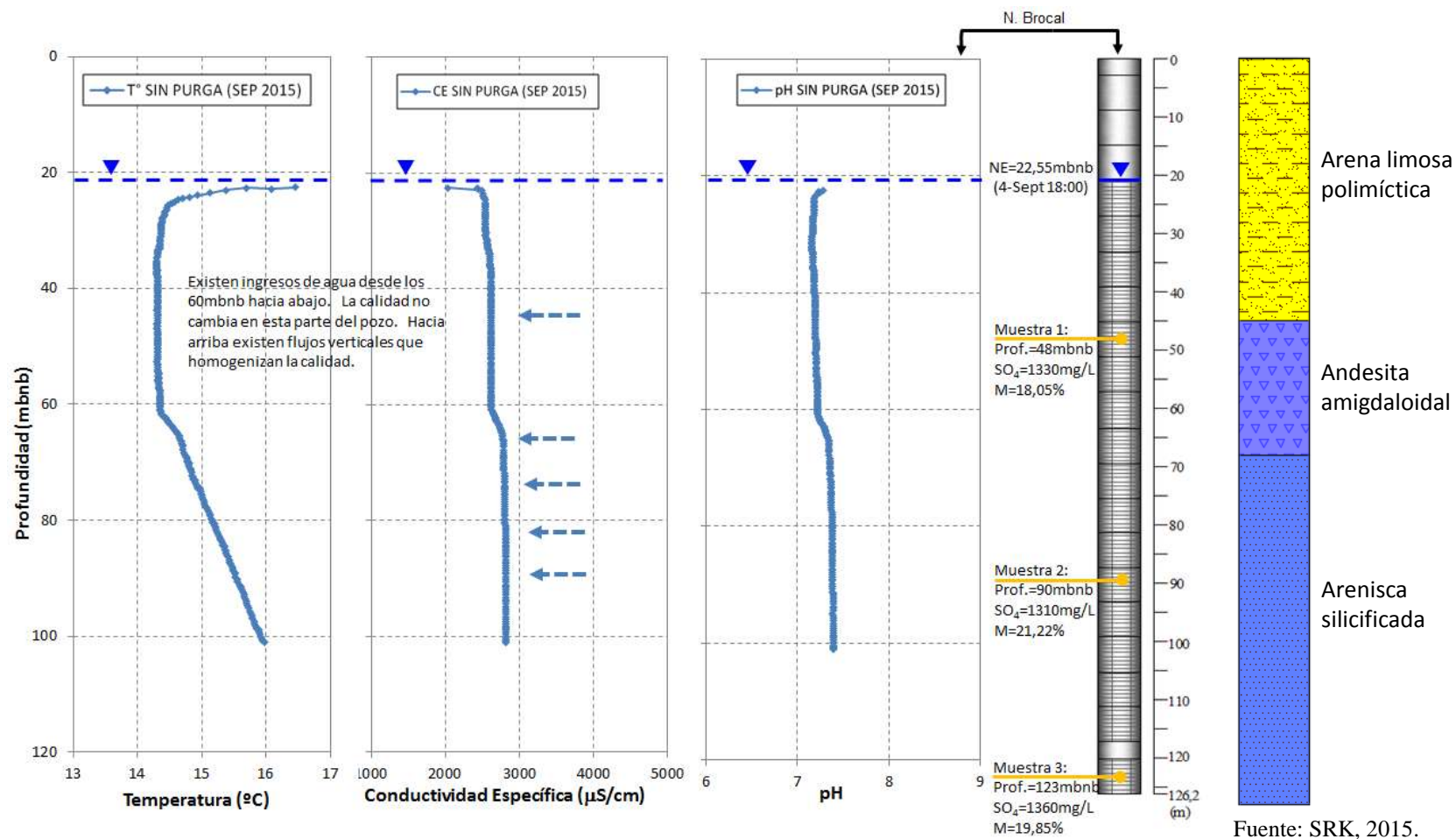
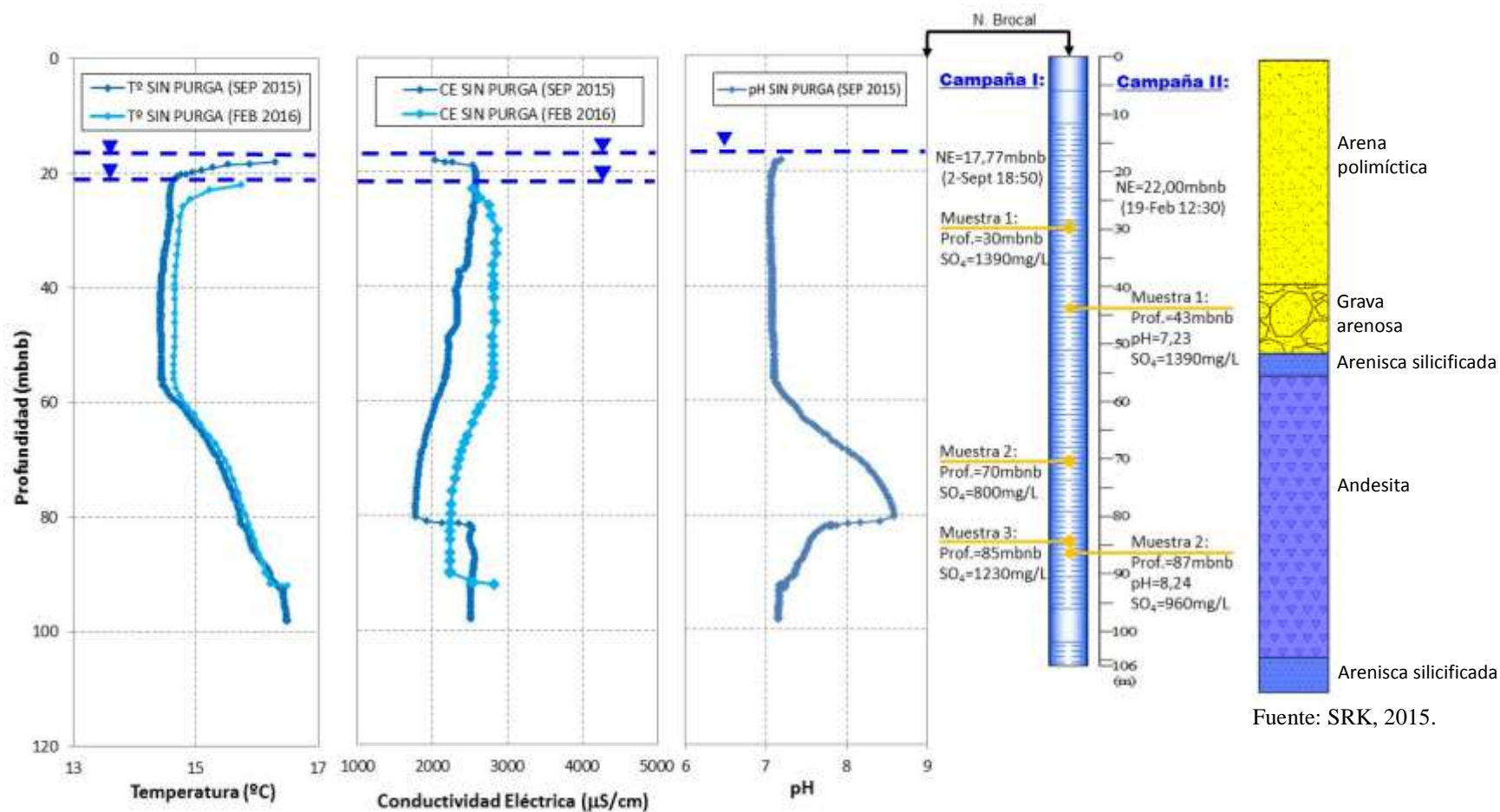


Figura 4.7: Perfilajes físico-químicos, habilitación y puntos de muestreo en **pozo POB-8A** Campaña I.



Fuente: SRK, 2015.

Figura 4.8: Perfilajes físico-químicos, habilitación y puntos de muestreo en **pozo PRLB-7** Campaña I.



Fuente: SRK, 2015.

Figura 4.9: Perfilajes físico-químicos, habilitación y puntos de muestreo en **pozo PRLB-8** Campañas I y II.

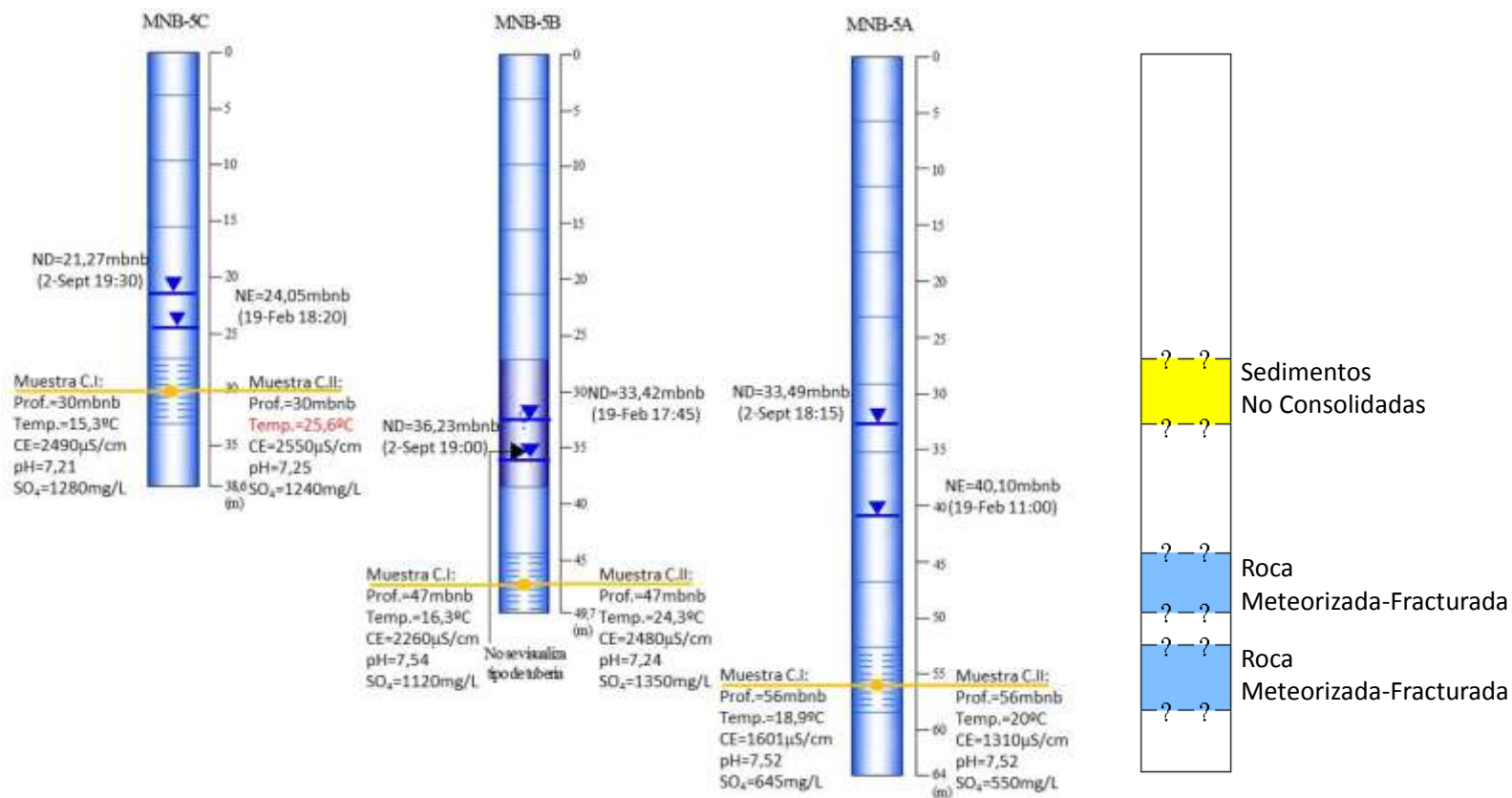


Figura 4.10: Habilitación y puntos de muestreo en pozo multinivel MNB-5 Campañas I y II.

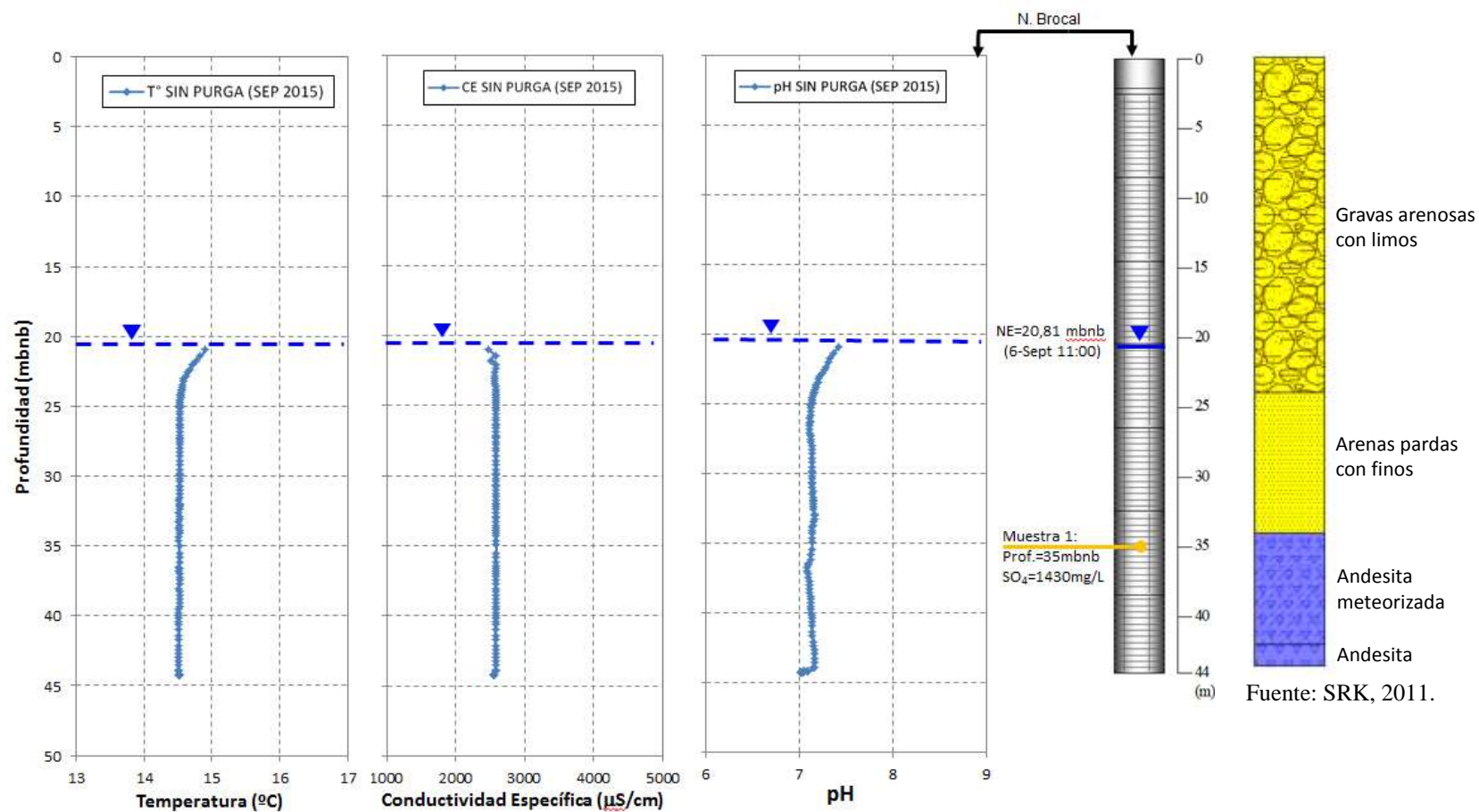


Figura 4.11: Perfilajes físico-químicos, habilitación y puntos de muestreo en **pozo POB-7B** Campaña I.

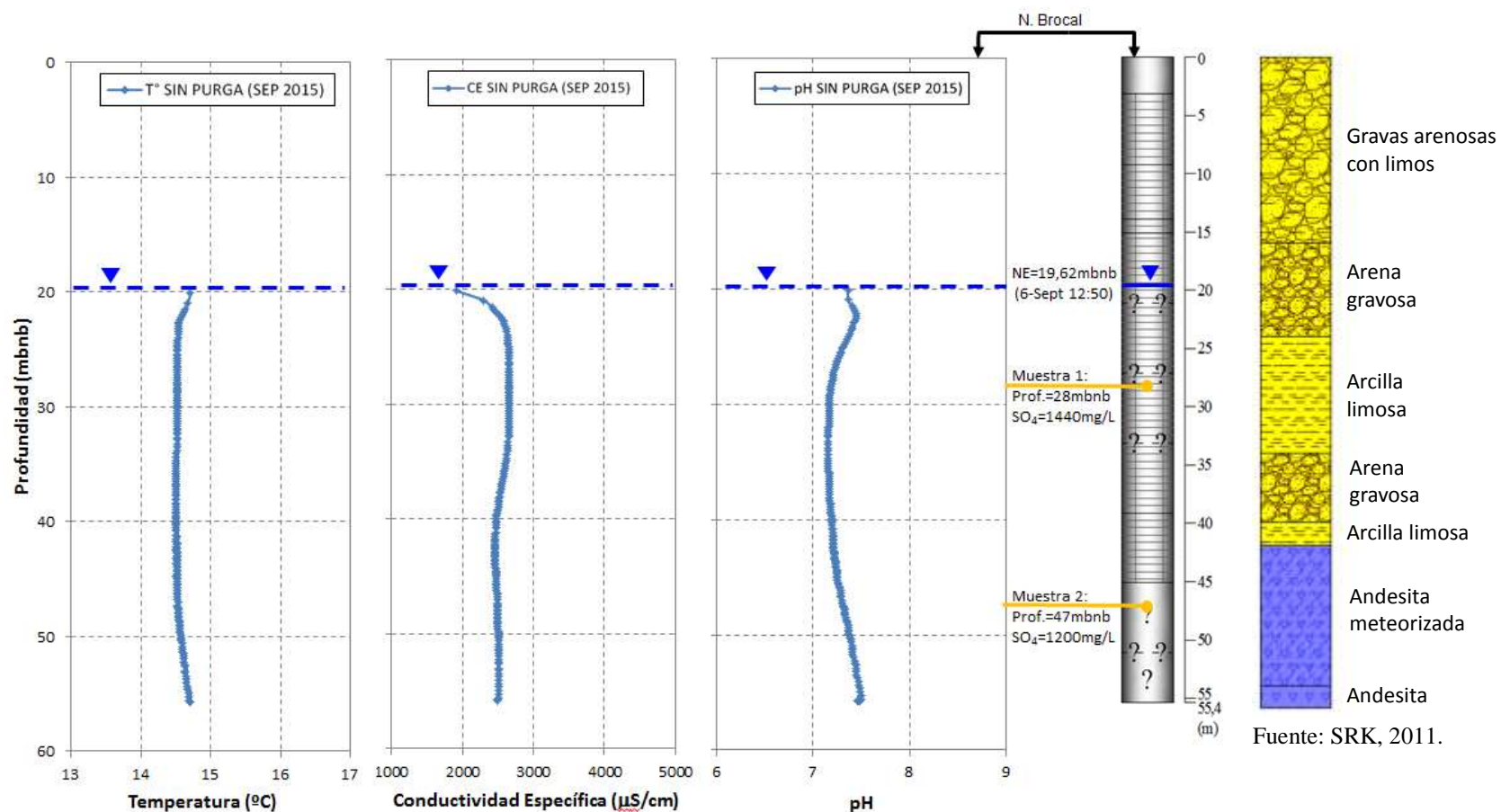


Figura 4.12: Perfilajes físico-químicos, habilitación y puntos de muestreo en **pozo PBB-7** Campaña I.

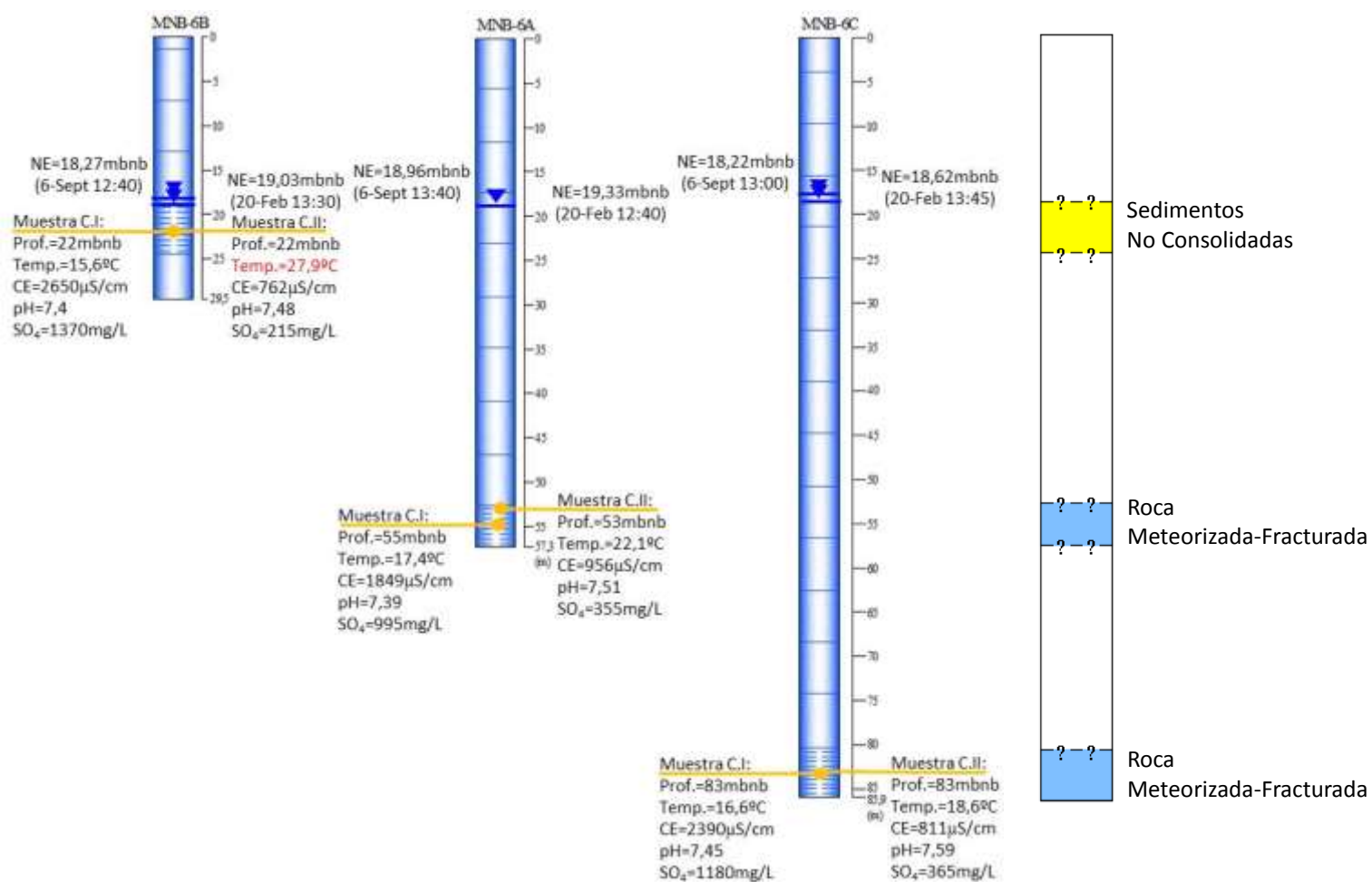


Figura 4.13: Habilitación y puntos de muestreo en **pozo multinivel MNB-6** Campañas I y II.

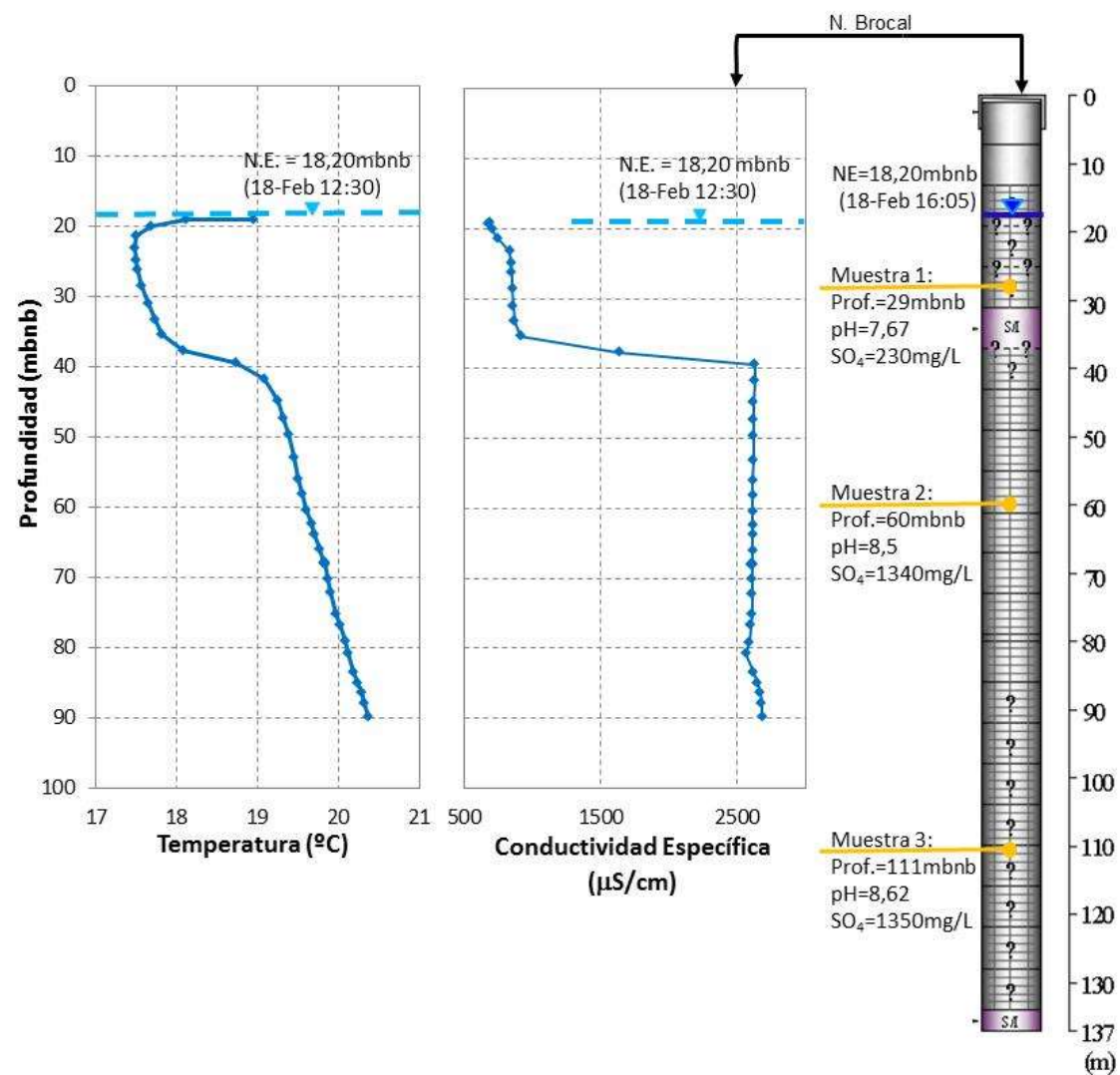


Figura 4.14: Habilitación y puntos de muestreo en **pozo WE-2** Campaña II.

En las **Tablas N°4.1 a N°4.6** se presentan las mediciones puntuales de terreno en aguas superficiales, subterráneas y en aguas del Depósito de Lamas, respectivamente, para las Campañas I y II.

Tabla N°4.1: Parámetros físico-químicos medidos en terreno para Aguas Superficiales Campaña I.

ID Monitoreo	Fecha	Hora	Q (L/s)	Profundidad muestra (mbnb)	C.E. (μS/cm)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH	Temp. (°C)	SO ₄ (mg/L)
LM-31	04/09/2015	12:05	23,5	Superficial	1205	0,64	7,51	5,3	680
GPLB-1	02/09/2015	12:25	NA	Superficial	885	7,33	8,42	13,7	255

NA: No aplica.

Tabla N°4.2: Parámetros físico-químicos medidos en terreno para Aguas Subterráneas Campaña I.

ID Monitoreo	Fecha	Hora	N.E. (mbnb)	Profundidad muestra (mbnb)	C.E. (μS/cm)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH	Temp. (°C)	SO ₄ (mg/L)
MNB-4A	05/09/2015	11:00	7,53	25	1156	3,91	7,23	8,4	510
MNB-4B	05/09/2015	11:00	7,730	14	1220	2,07	6,83	10,2	600
MNB-4C	04/09/2015	13:05	7,63	9	1319	1,86	6,98	12,5	660
MNL-3A	05/09/2015	13:15	13,85	15,5	570	6,3	7,83	14,9	78
PZLB-2	06/09/2015	18:14	10,18	38	886	3,89	7,44	12,3	110
PZLB-1A	07/09/2015	10:35	11,33	31	8750 ⁽¹⁾	1,37	12,62 ⁽¹⁾	14,1	515
PZLB-1B	06/09/2015	19:19	11,22	27	7439 ⁽¹⁾	4,18	12,82 ⁽¹⁾	9,86	455
PZLB-1C	07/09/2015	10:35	6,84	15	2750	1,96	7,26	15,7	1400
PRLB-1 (21 m)	01/09/2015	19:30	18,23	21	2860	6,98	7,38	14,3	1650
PRLB-1 (42 m)	01/09/2015	19:00	18,22	42	2810	2,17	7,24	14,8	1520
PRLB-2 (26 m)	06/09/2015	10:45	18,66	26	2830	2,54	7,22	12,9	1480
PRLB-2 (49 m)	06/09/2015	11:20	18,66	49	2830	2,91	7,18	15	1490
PRLB-3 (25 m)	06/09/2015	17:20	15,16	25	2930	2,62	7,47	13,4	1440
PRLB-3 (40 m)	02/09/2015	16:00	15,2	40	3140	0,88	7,15	20,8	1610
PRLB-3 (60 m)	02/09/2015	16:50	15,2	60	3140	SM	7,07	17,6	1570
POB-8A	06/09/2015	16:20	18,42	34	2750	5,99	7,37	15,4	1230
PRLB-7 (48 m)	05/09/2015	16:55	22,52	48	2670	2,45	7,21	19,4	1330
PRLB-7 (90 m)	05/09/2015	17:45	22,52	90	2610	2,49	7,42	15,8	1310
PRLB-7 (123 m)	05/09/2015	18:30	22,52	123	2620	2,88	7,31	15,7	1360
GPLB-2	07/09/2015	12:05	NA	NA	2690	4,03	7,35	15,2	1350
PRLB-8 (30 m)	04/09/2015	17:25	18,04	30	2610	2,38	7,06	18	1390
PRLB-8 (70 m)	04/09/2015	17:45	18,04	70	1958	3,73	8,12	15,9	800
PRLB-8 (85 m)	04/09/2015	18:05	18,04	85	2660	1,32	7,59	15,4	1230
MNB-5A	02/09/2015	18:15	33,49 ^(ND)	56	1601	4,5	7,52	18,9	645
MNB-5B	02/09/2015	19:00	36,23 ^(ND)	47	2260	4,3	7,54	16,3	1120
MNB-5C	02/09/2015	19:30	21,27 ^(ND)	30	2490	3,75	7,21	15,3	1280
BRW-2	01/09/2015	16:15	27,11 ^(ND)	NA	2140	4,67	7,53	15,4	990
BRW-1	01/09/2015	15:45	21,58 ^(ND)	NA	2630	3,21	7,4	15	1300
PBB-1	01/09/2015	14:42	25,83 ^(ND)	NA	2650	3,31	7,09	15,3	1510
POB-8B	01/09/2015	15:20	23,67 ^(ND)	NA	2650	4,11	7,37	15,5	1300
POB-7B	06/09/2015	19:00	20,81	35	2690	3,2	7,29	13,5	1430
PBB-7 (28 m)	06/09/2015	17:55	19,61	28	2760	3,12	7,28	13,9	1440
PBB-7 (47 m)	06/09/2015	18:25	19,61	47	2590	2,04	7,47	13,1	1200
MNB-6A	06/09/2015	13:40	18,96	55	1849	4,11	7,39	17,4	995
MNB-6C ⁽²⁾	06/09/2015	13:00	18,22	83	2390	3,36	7,45	16,6	1180
MNB-6B ⁽²⁾	06/09/2015	12:40	18,27	22	2650	3,32	7,4	15,6	1370
POB-7A	02/09/2015	11:11	SM	NA	2140	4,41	7,41	15,3	1120

NA: No aplica.

ND: Nivel dinámico.

SM: Sin medición.

(1) pH y CE elevados verificados con Troll 9500.

(2) Nombre según placa

Tabla N°4.3: Parámetros físico-químicos medidos en terreno para aguas depósito de lamas Campaña I.

ID Monitoreo	Fecha	Hora	Q (L/s)	Profundidad muestra (mbnb)	C.E. (μS/cm)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH	Temp. (°C)	SO ₄ (mg/L)
LM-56	02/09/2015	11:50	NA	Superficial	3090	4,99	10,41	12,6	1610
LM-49	07/09/2015	11:20	Regleta. 19cm	Superficial	3010	5,51	7,63	12,7	1360

NA: No aplica.

Tabla N°4.4: Parámetros físico-químicos medidos en terreno para Aguas Superficiales Campaña II.

ID Monitoreo	Fecha	Hora	Q (L/s)	Profundidad muestra (mbnb)	C.E. (μS/cm)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH	Temp. (°C)	SO ₄ (mg/L)
LM-42	16/02/2016	13:00	1,3	Superficial	423	5,43	8,63	15,1	98
LM-51	16/02/2016	13:30	NA	Superficial	448	5,93	7,99	8,8	98
LM-31	16/02/2016	18:00	Regleta=30cm	Superficial	1088	4,46	8,17	16,8	580
GPLB-3	17/02/2016	17:45	0,075	Superficial	601	3,58	7,01	17,4	195
GPLB-4	17/02/2016	18:15	0,072	Superficial	1231	2,38	6,78	20,4	445
LM-10	20/02/2016	11:10	557	Superficial	531	4,19	7,98	9,8	165
LM-27	20/02/2016	10:00	616	Superficial	593	6,34	8,41	8,9	200

NA: No aplica.

Tabla N°4.5: Parámetros físico-químicos medidos en terreno para Aguas Subterráneas Campaña II.

ID Monitoreo	Fecha	Hora	N.E. (mbnb)	Profundidad muestra (mbnb)	C.E. (μS/cm)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH	Temp. (°C)	SO ₄ (mg/L)
PZL-1	16/02/2016	12:10	5,21	10	421	7,67	6,99	8,9	79
MNB-4A	16/02/2016	19:00	10,72 ^(ND)	25	1086	3,72	7,16	12	545
MNB-4B	16/02/2016	18:45	8,19 ^(ND)	14	1093	4,43	6,79	12,1	555
MNB-4C	16/02/2016	18:30	7,81 ^(ND)	9	1198	3,84	6,54	15,4	485
MNL-3A	16/02/2016	16:15	13,89	15,5	574	7,73	7,81	17,9	65
PRLB-1	20/02/2016	17:35	SM	NA	2750	3,88	7,38	16,4	1550
PRLB-2	21/02/2016	11:25	SM	NA	2840	4,34	7,45	16,1	1540
PRLB-3	21/02/2016	10:30	SM	NA	2840	5,36	7,62	16,7	1660
PRLB-4	21/02/2016	10:50	SM	NA	2850	3,71	7,59	15,9	1620
PRLB-5	20/02/2016	17:50	SM	NA	2810	3,53	7,41	16,1	1490
PRLB-6	21/02/2016	11:10	SM	NA	2900	4,98	7,48	17,1	1610
PRLB-7	21/02/2016	10:15	SM	NA	2720	5,23	7,61	15,2	1340
PRLB-8 (43 m)	19/02/2016	12:30	22,00	43	2600	3,12	7,23	17,2	1390
PRLB-8 (87 m)	19/02/2016	13:10	22,00	87	2020	3,59	8,24	17,8	960
PRLB-9	19/02/2016	15:30	SM	NA	2700	6,4	7,4	16,5	1310
P2-TR	17/02/2016	14:00	17,75	21	3040	2,75	7,29	22,8	1710
POB-8A	20/02/2016	16:10	21,60	34	2870	3,32	7,3	18,4	1400
GPLB-2	21/02/2016	9:45	SM	NA	2560	5,3	7,56	15,8	1430
MNB-5A	19/02/2016	11:00	40,10	56	1310	5,64	7,52	20	550
MNB-5B	19/02/2016	17:45	33,42	47	2480	3,25	7,24	24,3	1350
MNB-5C	19/02/2016	18:20	24,05	30	2550	2,66	7,25	25,6 ⁽¹⁾	1240
BRW-2	19/02/2016	18:30	SM	NA	2008	4,8	7,66	16,4	1110
BRW-1	19/02/2016	19:00	SM	NA	2510	4,3	7,56	16	1400
PBB-1	17/02/2016	18:50	SM	NA	2620	5,17	7,55	16,1	1540
POB-8B	17/02/2016	16:55	SM	NA	2470	4,6	7,58	18	1410
MNB-6A	20/02/2016	12:40	19,33	53	956	3,91	7,51	22,1	355
MNB-6B	20/02/2016	13:30	19,03	22	762	4,13	7,48	27,9 ⁽¹⁾	215
MNB-6C	20/02/2016	13:45	18,62	83	811	5,12	7,59	18,6	365
POB-7A	17/02/2016	16:20	SM	NA	2550	3,69	7,55	20,8	1450
WP-1	17/02/2016	15:40	SM	NA	751	4,99	7,77	16,6	190
WE-2 (29 m)	18/02/2016	16:05	18,20	29	826	1,16	7,67	19,1	230
WE-2 (60 m)	18/02/2016	16:45	18,20	60	2320	1,01	8,5	20,1	1340
WE-2 (111 m)	18/02/2016	17:45	18,20	111	2490	1,24	8,62	20,9	1350

NA: No aplica.

ND: Nivel dinámico.

SM: Sin medición.

(1) Calentamiento artificial de manquera

Tabla N°4.6: Parámetros físico-químicos medidos en terreno para aguas depósito de lamas Campaña II.

ID Monitoreo	Fecha	Hora	Q (L/s)	Profundidad muestra (mbnb)	C.E. (μS/cm)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH	Temp. (°C)	SO ₄ (mg/L)
GPLB-5	20/02/2016	18:20	NA	NA	3500	3,17	10,36	26,3	1870
GPLB-1	17/02/2016	10:55	NA	Superficial	3010	3,94	8,78	20,9	1700
LM-56	17/02/2016	10:20	NA	Superficial	3470	4,04	11,09	20,6	1840
LM-49	20/02/2016	17:05	Regleta=30cm	Superficial	3190	5,43	7,38	16,9	1850

NA: No aplica.

4.2 ANALISIS DE LABORATORIO

4.2.1 Hidroquímica

En las **Tablas N° 4.7 y N°4.8** se presentan los resultados de los análisis físico-químicos realizados por el laboratorio certificado del DICTUC para la primera y segunda campaña de monitoreo, respectivamente. Los certificados de los análisis se incluyen en el **Anexo C**. Luego del control de calidad realizado por GP, todas las muestras cumplen el requisito de un Error del Balance Iónico menor que 10%.

En particular, las muestras de los piezómetros PZLB-01A y PZLB-01B fueron validadas comparando los datos de conductividad eléctrica y pH de terreno con los valores de laboratorio, los cuales coincidieron. El balance iónico en este caso dio menor al 5%, con altos valores de Carbonatos y Sodio/Potasio.

El análisis hidroquímico para la muestra del pozo multinivel MNB-6C en la segunda campaña no coincide con los parámetros de terreno, los cuales no están dentro del rango de aceptación:

CE _{terreno} =811 μS/cm	versus	CE _{lab} =2320 μS/cm
pH _{terreno} =7,59	versus	pH _{lab} =8,74
SO _{4terreno} =365 mg/L	versus	SO _{4lab} =1076,2 mg/L

Debido a lo anterior, se descarta el análisis hidroquímico de esta muestra.

En el punto GPLB-5 de la segunda campaña de monitoreo, se pudo rescatar poca cantidad de agua para la muestra (sobrenadante del relave), por lo tanto solamente se solicitó análisis de macroelementos.

Tabla N°4.7: Resultados hidroquímica del muestreo realizado por GP en Septiembre de 2015.

ID Monitoreo	AT	Al	As	Ba	Be	HCO3	B	Cd	Ca	CO3	CN	Cl	Co	Cu	CE Lab	Cr	F	Fe	Li	Mg
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(uS/cm)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
LM-31	26,53	2,48	0,016	0,04	<0,01	32,37	0,09	<0,0015	225	<0,02	<0,05	11,7	<0,01	0,01	1369	<0,01	0,73	0,16	0,06	59,8
MNB-4A	158,55	0,05	<0,006	0,07	<0,01	193,43	0,03	<0,0015	139,8	<0,02	<0,05	6,56	<0,01	0,01	1084	<0,01	0,35	0,15	0,04	42,6
MNB-4B	112,07	0,14	<0,006	0,03	<0,01	136,73	0,08	<0,0015	147,9	<0,02	<0,05	8,56	<0,01	0,01	1145	<0,01	0,43	1,42	0,05	47,3
MNB-4C	116,31	3,53	<0,006	0,03	<0,01	141,89	0,05	<0,0015	142,6	<0,02	<0,05	7,06	<0,01	0,03	950	<0,01	0,3	5,84	0,04	40,5
MNL-3A	213,82	0,02	<0,006	0,07	<0,01	260,85	0,02	<0,0015	70,4	<0,02	<0,05	17,1	<0,01	<0,01	554	<0,01	0,1	0,07	0,02	36,4
GPLB-1	178,12	0,05	0,022	0,07	<0,01	217,3	0,23	<0,0015	78,4	<0,02	<0,05	27,9	<0,01	0,02	851	0,01	0,31	0,08	0,06	65,9
LM-56	61,01	0,17	0,025	0,07	<0,01	74,43	0,11	0,009	470,1	<0,02	<0,05	124,6	<0,01	0,01	2960	0,01	0,8	0,04	0,02	13
PZLB-2	266,21	0,05	<0,006	0,06	<0,01	324,78	0,21	<0,0015	77,5	<0,02	<0,05	17,46	<0,01	0,01	772	<0,01	0,17	0,27	0,04	30,7
PZLB-1A	1870	0,1	0,016	0,2	<0,01	70,79 ⁽¹⁾	0,25	<0,0015	397,7	1079 ⁽¹⁾	<0,05	139,3	<0,01	0,03	6850	<0,01	0,18	0,49	0,3	13,4
PZLB-1B	3456	0,16	0,031	0,2	<0,01	150,09 ⁽¹⁾	0,05	<0,0015	814,9	2000 ⁽¹⁾	<0,05	85	<0,01	0,01	8640	<0,01	0,14	0,19	0,76	4,68
PZLB-1C	66,5	0,05	0,032	0,04	<0,01	81,13	0,18	<0,0015	273,4	<0,02	<0,05	89,78	<0,01	0,03	2710	<0,01	0,24	0,54	0,08	102,7
LM-49	71,68	0,06	0,026	0,08	<0,01	87,45	0,22	<0,0015	435,5	<0,02	<0,05	105,7	<0,01	0,01	2880	<0,01	0,32	0,19	0,06	96,4
PRLB-1 (21 m)	6,07	0,02	<0,006	0,04	<0,01	7,41	0,12	<0,0015	341,3	<0,02	<0,05	113,2	<0,01	0,03	2730	<0,01	0,37	0,05	0,06	154,7
PRLB-1 (42 m)	7,25	0,04	0,021	0,03	<0,01	8,84	0,16	<0,0015	312,6	<0,02	<0,05	101,6	<0,01	0,02	2710	<0,01	0,3	0,03	0,07	145,3
PRLB-2 (26 m)	82,36	0,02	0,018	0,01	<0,01	100,47	0,06	<0,0015	420,2	<0,02	<0,05	118,8	<0,01	0,01	2690	<0,01	0,29	0,03	0,04	116,7
PRLB-2 (49 m)	70,98	0,03	0,014	0,01	<0,01	86,6	0,03	<0,0015	402	<0,02	<0,05	121,3	<0,01	<0,01	2700	<0,01	0,27	0,05	0,04	122,3
PRLB-3 (25 m)	91,11	0,83	0,013	<0,01	<0,01	111,15	<0,01	<0,0015	407,5	<0,02	<0,05	126,7	<0,01	<0,01	2680	<0,01	0,34	<0,03	0,02	121
PRLB-3 (40 m)	154,6	0,02	0,041	0,06	<0,01	188,61	0,38	<0,0015	155,3	<0,02	<0,05	113,8	<0,01	0,02	3050	0,01	0,31	0,15	0,15	161,9
PRLB-3 (60 m)	150,89	0,09	0,094	0,03	<0,01	184,08	0,53	0,011	470,9	<0,02	<0,05	224	0,01	0,01	3340	0,01	0,39	0,5	0,11	148,7
POB-8	84,42	0,05	0,017	0,07	<0,01	50,65 ⁽¹⁾	0,06	<0,0015	356,3	<0,02 ⁽¹⁾	<0,05	109,8	<0,01	0,01	2710	<0,01	0,27	49,8	0,07	100,9
PRLB-7 (48 m)	84,04	0,02	0,037	0,07	<0,01	102,52	0,03	<0,0015	403,6	<0,02	<0,05	127,3	<0,01	0,02	2720	<0,01	0,26	0,06	0,05	128,3
PRLB-7 (90 m)	94,97	0,05	0,03	0,04	<0,01	115,82	0,1	<0,0015	378,3	<0,02	<0,05	90,1	<0,01	0,02	2480	<0,01	0,23	0,11	0,07	93
PRLB-7 (123 m)	92,05	0,05	0,032	0,04	<0,01	112,3	0,12	<0,0015	414,5	<0,02	<0,05	164,9	<0,01	0,02	2540	<0,01	0,22	0,14	0,08	116,5
GPLB-2	98,81	0,03	0,021	0,05	<0,01	120,54	0,17	<0,0015	428,2	<0,02	<0,05	125,6	<0,01	0,02	2680	<0,01	0,29	0,18	0,09	129,8
PRLB-8 (30 m)	83,55	0,06	0,025	0,04	<0,01	101,92	0,09	<0,0015	298,9	<0,02	<0,05	84	<0,01	0,02	2900	<0,01	0,24	0,03	0,07	200,7

ID Monitoreo	AT	Al	As	Ba	Be	HCO3	B	Cd	Ca	CO3	CN	Cl	Co	Cu	CE Lab	Cr	F	Fe	Li	Mg
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(uS/cm)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
PRLB-8 (70 m)	136,01	0,04	0,026	0,03	<0,01	165,93	0,1	<0,0015	116,9	<0,02	<0,05	57,5	<0,01	0,02	1911	<0,01	0,27	0,1	0,11	42,9
PRLB-8 (85 m)	120,47	0,04	0,044	0,03	<0,01	146,97	0,44	<0,0015	405,9	<0,02	<0,05	150,1	<0,01	0,02	2970	<0,01	0,36	0,15	0,1	104,8
MNB-5A	140,32	0,18	0,023	0,03	<0,01	171,18	0,16	<0,0015	195,5	<0,02	<0,05	66,1	<0,01	0,04	1514	0,02	0,39	0,25	0,07	76,6
MNB-5B	164,31	0,13	0,033	0,07	<0,01	200,46	0,14	<0,0015	400,6	<0,02	<0,05	95,3	<0,01	0,02	2210	0,01	0,35	0,12	0,08	125,9
MNB-5C	114,84	0,01	0,025	0,05	<0,01	140,1	0,1	0,008	352,8	<0,02	<0,05	108,5	<0,01	0,01	2370	0,01	0,32	<0,03	0,06	117,1
BRW-2	86,17	0,01	<0,006	0,06	<0,01	105,13	0,2	<0,0015	258,5	<0,02	<0,05	74,7	<0,01	0,04	2020	<0,01	0,27	<0,03	0,1	67,6
BRW-1	21,56	0,01	0,021	0,07	<0,01	26,3	0,19	<0,0015	306,9	<0,02	<0,05	95,9	<0,01	0,04	2430	<0,01	0,28	<0,03	0,11	108
PBB-1	89,15	0,03	<0,006	0,08	<0,01	108,76	0,19	<0,0015	288,5	<0,02	<0,05	89,6	<0,01	0,04	2490	<0,01	0,31	<0,03	0,12	118,9
POB-8B	87,08	0,02	0,027	0,05	<0,01	106,24	0,23	<0,0015	299,3	<0,02	<0,05	111,1	<0,01	0,04	2570	<0,01	0,28	<0,03	0,12	128
POB-7B	84,46	0,07	0,023	0,07	<0,01	103,04	0,06	<0,0015	248	<0,02	<0,05	101,3	<0,01	0,01	2670	<0,01	0,34	40,8	0,09	156,2
PBB-7 (28 m)	91,18	0,04	0,023	0,03	<0,01	11,23	0,07	<0,0015	272	<0,02	<0,05	113,1	<0,01	0,02	2720	<0,01	0,25	13,6	0,07	196,2
PBB-7 (47 m)	84,35	0,04	0,018	0,03	<0,01	102,91	<0,01	<0,0015	389,6	<0,02	<0,05	90,6	<0,01	0,01	2470	<0,01	0,24	25,5	0,04	110,2
MNB-6A	125,93	0,03	0,012	0,04	<0,01	153,63	0,12	<0,0015	293,1	<0,02	<0,05	74,8	<0,01	0,01	1821	<0,01	0,28	0,05	0,06	70,8
MNB-6C	130,06	0,07	<0,006	0,03	<0,01	158,67	0,12	<0,0015	342	<0,02	<0,05	86,5	<0,01	0,01	2470	<0,01	0,34	0,09	0,08	101,1
MNB-6B	92,05	0,06	0,018	0,04	<0,01	112,3	0,12	<0,0015	406,6	<0,02	<0,05	116,6	<0,01	0,02	2570	<0,01	0,27	0,08	0,07	124,5
POB-7A	146,97	0,02	0,027	0,04	<0,01	179,3	0,13	<0,0015	365	<0,02	<0,05	80,8	<0,01	0,03	2350	0,01	0,29	0,09	0,08	112,5

(1) Valor modificado por el laboratorio, luego del control de calidad efectuado por GP.

Tabla N°4.7: Resultados hidroquímica del muestreo realizado por GP en Septiembre de 2015 (continuación).

ID Monitoreo	Mn	Hg	Mo	Ni	NO3	pH Lab	Ag	Pb	K	Se	Na	Na%	SDT	SST	SO4	V	Zn	BI Lab
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(-)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	%	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	%
LM-31	0,84	<0,001	0,01	0,02	<0,5	7,66	0,01	<0,003	5,05	<0,004	37,2	9,04	1120	<10	803,3	0,02	0,22	0,87
MNB-4A	0,04	<0,001	<0,01	<0,01	2,56	7,41	<0,01	<0,003	2,67	<0,004	25,5	9,51	790	<10	351,5	<0,01	0,03	4,21
MNB-4B	0,1	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	6,94	<0,01	<0,003	2,24	<0,004	24,5	8,6	950	<10	540,1	0,02	0,06	5,1
MNB-4C	1,01	<0,001	<0,01	0,02	<0,5	7,2	0,02	<0,003	2,57	<0,004	27,5	10,2	780	52	480,9	0,01	0,12	3,41
MNL-3A	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	7,1	8,27	<0,01	<0,003	1,92	<0,004	19,1	11,2	460	<10	89,6	<0,01	<0,01	4,6
GPLB-1	0,03	<0,001	0,01	<0,01	39,7	8,2	<0,01	0,009	2,92	<0,004	35,5	14,1	714	<10	263,7	0,01	0,02	2,21
LM-56	0,01	<0,001	0,86	<0,01	12,8	9,93	0,03	<0,003	54,6	<0,004	232,4	28	2470	<10	1557,8	<0,01	0,01	1,84
PZLB-2	0,02	<0,001	<0,01	<0,01	11,2	7,6	<0,01	<0,003	3,37	<0,004	23,5	13,6	595	<10	107,9	0,02	0,02	4,72
PZLB-1A	0,02	<0,001	0,01	<0,01	<0,5	13,05	<0,01	<0,003	721,1	<0,004	480,9	34,7	5320	57	1218,5	<0,01	0,15	5,03
PZLB-1B	0,02	<0,001	0,01	<0,01	<0,5	13,01	0,02	<0,003	352,4	<0,004	662,3	36,5	7020	<10	673,7	<0,01	0,02	4,06dx
PZLB-1C	0,02	<0,001	0,02	<0,01	4,53	7,37	0,02	<0,003	4,44	<0,004	86,5	14,5	2120	<10	1172,3	0,03	0,23	4,37
LM-49	5	<0,001	0,67	0,01	<0,5	7,66	<0,01	<0,003	24,3	<0,004	117,3	14,4	2350	<10	1342,1	0,02	0,02	4,4
PRLB-1 (21 m)	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,36	0,03	<0,003	4,13	<0,004	70,7	9,34	2055	<10	1406,9	0,06	0,03	0,51
PRLB-1 (42 m)	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,29	0,03	<0,003	3,4	<0,004	68,9	9,78	1917	<10	1407,6	0,07	0,02	2,71
PRLB-2 (26 m)	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	8,88	7,76	0,02	<0,003	4,37	<0,004	114,6	14	2270	<10	1556,9	0,03	0,02	2,58
PRLB-2 (49 m)	<0,01	<0,001	0,01	<0,01	9,5	7,43	0,01	<0,003	4,3	<0,004	117,7	14,5	2280	<10	1398,9	<0,01	0,01	1,77
PRLB-3 (25 m)	0,22	<0,001	<0,01	<0,01	9,69	7,75	0,01	<0,003	5,52	<0,004	123,6	15	2210	<10	1449,4	<0,01	<0,01	0,11
PRLB-3 (40 m)	0,45	<0,001	0,04	0,02	<0,5	7,15	0,02	0,012	65,6	<0,004	177,6	25,4	2490	<10	1026	0,07	0,11	4,84
PRLB-3 (60 m)	0,76	<0,001	0,01	0,02	<0,5	7,19	<0,01	0,004	95,3	<0,004	240	21,5	2500	<10	1722,2	0,04	0,02	3,65
POB-8A	0,64	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,46	0,01	<0,003	3,53	<0,004	82,7	12,1	2270	128	1348,9	0,05	0,02	4,95
PRLB-7 (48 m)	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	12,3	7,53	0,02	<0,003	4,12	<0,004	83,4	10,5	2260	<10	1524,2	0,04	0,01	3,87
PRLB-7 (90 m)	0,01	<0,001	<0,01	0,02	<0,5	7,47	0,02	<0,003	4,05	<0,004	70	10,3	2030	<10	1107,7	0,03	1,5	3,8
PRLB-7 (123 m)	0,01	<0,001	<0,01	<0,01	42	7,61	0,02	<0,003	3,96	<0,004	77,1	9,94	2130	<10	1347,3	0,03	0,05	2,17
GPLB-2	0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,59	0,02	<0,003	4,04	<0,004	91	11	2250	<10	1478	0,04	0,25	0,25
PRLB-8 (30 m)	0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,36	0,02	<0,003	2,8	<0,004	53,6	6,89	2410	<10	1556,5	0,03	<0,01	3,72

ID Monitoreo	Mn	Hg	Mo	Ni	NO3	pH Lab	Ag	Pb	K	Se	Na	Na%	SDT	SST	SO4	V	Zn	BI Lab
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(-)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	%	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	%
PRLB-8 (70 m)	0,02	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	8,29	<0,01	<0,003	4,45	<0,004	282,4	56,5	1590	<10	761	0,02	0,02	3,75
PRLB-8 (85 m)	0,02	<0,001	0,01	<0,01	10,8	7,68	0,02	<0,003	10,6	<0,004	140,8	17,4	2460	<10	1414,7	0,04	0,02	1,4
MNB-5A	0,03	<0,001	<0,01	0,02	8,65	7,61	<0,01	0,006	2,67	<0,004	45,2	10,9	1240	<10	694,2	0,04	0,08	3,14
MNB-5B	0,02	<0,001	<0,01	0,02	8,2	7,33	0,02	0,011	4,05	<0,004	64,9	8,48	1830	<10	1183	0,04	0,11	3,97
MNB-5C	0,01	<0,001	<0,01	<0,01	7,71	7,25	<0,01	0,008	3,34	<0,004	63,1	9,13	1930	<10	1331,7	0,03	0,01	4,96
BRW-2	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,38	0,02	<0,003	3,45	<0,004	70,2	14,1	1408	<10	893,2	0,11	0,03	1,87
BRW-1	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,28	0,02	<0,003	4,79	<0,004	76,4	12	1742	<10	1245	0,1	0,04	2,49
PBB-1	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,3	0,02	<0,003	4,81	<0,004	75,1	11,9	1806	<10	1192,1	0,11	0,05	2,76
POB-8B	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,26	0,02	<0,003	4,84	<0,004	76,4	11,5	1825	<10	1245,5	0,11	0,04	3,17
POB-7B	0,72	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,4	0,01	<0,003	4,13	<0,004	77,7	11,8	2220	202	1239	0,08	0,04	3,01
PBB-7 (28 m)	0,08	<0,001	0,01	<0,01	23,1	7,66	0,02	<0,003	2,38	<0,004	41,4	5,7	2230	46	1395,8	0,04	0,02	4,35
PBB-7 (47 m)	0,27	<0,001	<0,01	<0,01	55,8	7,59	0,02	<0,003	3,18	<0,004	53,9	7,58	2050	55	1143,9	0,02	0,01	4,03
MNB-6A	0,02	<0,001	<0,01	0,01	<0,5	7,48	<0,01	<0,003	3,6	<0,004	44,8	8,66	1420	<10	895,6	0,04	0,01	1,71
MNB-6C	0,03	<0,001	0,03	<0,01	<0,5	8,09	<0,01	<0,003	4,01	<0,004	108,8	15,7	1980	22	1220,5	0,03	0,08	0,38
MNB-6B	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	8,09	<0,01	<0,003	3,59	<0,004	61,1	7,98	2070	<10	1410,6	0,04	0,05	1,79
POB-7A	0,02	<0,001	<0,01	<0,01	7,89	7,27	0,02	0,008	3,69	<0,004	59,6	8,6	1900	<10	1080,8	0,04	0,1	3,98

Tabla N°4.8: Resultados hidroquímica del muestreo realizado por GP en Febrero de 2016.

ID Monitoreo	AT	Al	As	Ba	Be	HCO3	B	Cd	Ca	CO3	CN	Cl	Co	Cu	CE Lab	Cr	F	Fe
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(uS/cm)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
PZL-1	77,52	0,39	<0,006	0,12	<0,01	94,52	0,06	<0,0015	63,2	0,02	<0,05	16,2	<0,01	0,03	416	<0,01	0,1	0,4
LM-42 (QUEBRADA ROCO)	2,86	0,17	<0,006	0,1	<0,01	4,24	0,05	<0,0015	65,3	0,02	<0,05	24,2	<0,01	0,01	413	<0,01	0,17	0,17
LM-51 (ZANJA ROCO)	76,04	0,06	0,008	0,1	<0,01	92,77	0,05	<0,0015	77,9	0,02	<0,05	18,3	<0,01	0,01	436	<0,01	0,1	0,04
LM-31	42,76	0,17	0,016	0,02	<0,01	52,17	0,09	<0,0015	125,8	0,02	<0,05	6,8	<0,01	0,02	1063	<0,01	0,54	0,07
MNB-4A	104,77	0,2	0,007	0,03	<0,01	127,82	0,09	<0,0015	130,5	0,02	<0,05	7,4	<0,01	0,02	1049	<0,01	0,32	0,43
MNB-4B	68,3	0,12	0,01	0,02	<0,01	83,32	0,09	<0,0015	118,4	0,02	<0,05	9,4	<0,01	0,02	1056	<0,01	0,34	2,2
MNB-4C	72,39	1,09	<0,006	0,04	<0,01	88,31	0,08	<0,0015	136	0,02	<0,05	8	<0,01	0,03	1083	<0,01	0,27	9,46
MNL-3A	150,72	0,4	<0,006	0,14	<0,01	183,88	0,08	<0,0015	66,9	0,02	<0,05	8,6	<0,01	0,04	561	<0,01	0,1	0,06
GPLB-5	-	-	-	-	-	138,78	-	-	1680	0,02	-	161	-	-	-	-	-	-
GPLB-1	21,15	0,03	0,022	0,11	<0,01	25,80	0,19	<0,0015	409,6	0,02	<0,05	111,7	<0,01	0,01	2950	<0,01	0,33	<0,03
LM-56	55,91	0,14	0,026	0,06	<0,01	68,21	0,2	<0,0015	403,9	0,02	<0,05	110,1	<0,01	<0,01	3410	<0,01	0,52	0,04
LM-49	89,58	0,06	0,014	0,07	<0,01	109,29	0,2	<0,0015	420,7	0,02	<0,05	135,2	<0,01	<0,01	3143	<0,01	0,28	0,1
PRLB-1	111,64	0,18	0,025	0,02	<0,01	136,19	0,2	<0,0015	319,8	0,02	<0,05	100,6	<0,01	0,02	2700	<0,01	0,35	0,17
PRLB-2	116,5	0,59	0,049	0,03	<0,01	114,82	0,14	<0,0015	368,5	0,02	<0,05	116,5	<0,01	0,02	2770	<0,01	0,37	0,04
PRLB-3	118,3	0,07	0,024	0,03	<0,01	144,32	0,33	<0,0015	310,6	0,02	<0,05	106,5	<0,01	0,04	2810	<0,01	0,41	0,12
PRLB-4	100,44	0,1	0,028	0,03	<0,01	122,53	0,35	<0,0015	358,6	0,02	<0,05	124,1	<0,01	0,04	2800	<0,01	0,27	0,06
PRLB-5	102,16	0,05	0,03	0,02	<0,01	124,63	0,23	<0,0015	312,8	0,02	<0,05	104,5	<0,01	0,03	2770	<0,01	0,24	0,07
PRLB-6	84,41	0,08	0,048	0,06	<0,01	103,20	0,18	<0,0015	338,5	0,02	<0,05	128,6	<0,01	0,02	2860	<0,01	0,25	0,06
PRLB-7	124,35	0,08	0,033	0,04	<0,01	151,70	0,24	<0,0015	326,7	0,02	<0,05	100,8	<0,01	0,03	2580	<0,01	0,29	0,22
PRLB-8 (43 m)	54,23	<0,01	0,008	0,04	<0,01	66,16	0,09	<0,0015	341,8	0,02	<0,05	113,2	<0,01	0,01	2550	<0,01	0,22	<0,03
PRLB-8 (87 m)	74,48	<0,01	0,011	0,02	<0,01	90,86	0,07	<0,0015	75,3	0,02	<0,05	69,6	<0,01	<0,01	2010	<0,01	0,21	<0,03
PRLB-9	47,22	<0,01	0,015	0,05	<0,01	57,60	0,08	<0,0015	339	0,02	<0,05	114	<0,01	0,01	2670	<0,01	0,26	0,03
P2-TR	54,36	<0,01	0,014	0,03	<0,01	66,32	0,15	<0,0015	359,3	0,02	<0,05	112,7	<0,01	<0,01	2970	<0,01	0,24	<0,03
POB-8A	104,15	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	127,06	0,01	<0,0015	316,1	0,02	<0,05	113,1	<0,01	<0,01	2700	<0,01	0,28	1,34
GPLB-2	138,64	<0,01	0,012	0,02	<0,01	169,14	0,29	<0,0015	297,3	0,02	<0,05	101,9	<0,01	0,02	2490	<0,01	0,31	<0,03

ID Monitoreo	AT	Al	As	Ba	Be	HCO3	B	Cd	Ca	CO3	CN	Cl	Co	Cu	CE Lab	Cr	F	Fe
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(uS/cm)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
MNB-5A	95,1	0,12	0,026	0,01	<0,01	116,01	0,06	<0,0015	160,5	0,02	<0,05	49,3	<0,01	0,02	1289	<0,01	0,33	0,23
MNB-5B	117,65	0,01	<0,006	0,03	<0,01	143,53	0,06	<0,0015	320,4	0,02	<0,05	118,9	<0,01	<0,01	2420	<0,01	0,26	<0,03
MNB-5C	118,92	0,09	0,039	0,02	<0,01	145,08	<0,01	<0,0015	295,7	0,02	<0,05	100,1	<0,01	0,02	2530	<0,01	0,25	0,07
BRW-2	145,99	0,01	<0,006	0,04	<0,01	178,10	0,14	<0,0015	234,3	0,02	<0,05	70,9	<0,01	0,02	2060	<0,01	0,3	<0,03
BRW-1	119,54	0,06	0,026	0,05	<0,01	145,84	0,14	<0,0015	279,3	0,02	<0,05	100,7	<0,01	0,04	2480	<0,01	0,23	0,1
PBB-1	56,29	<0,01	0,021	0,03	<0,01	68,67	0,04	<0,0015	344,3	0,02	<0,05	109,4	<0,01	<0,01	2550	<0,01	0,25	<0,03
POB-8B	66,7	<0,01	0,016	0,03	<0,01	81,37	0,09	<0,0015	342,3	0,02	<0,05	108,5	<0,01	0,01	2376	<0,01	0,31	<0,03
MNB-6A	220,53	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	269,04	0,28	<0,0015	114,7	0,02	<0,05	31,7	<0,01	0,02	918	<0,01	0,33	<0,03
MNB-6B	190,99	0,04	0,014	0,01	<0,01	233,00	0,09	<0,0015	98,8	0,02	<0,05	27,8	<0,01	0,02	737	<0,01	0,4	0,1
POB-7A	55,39	<0,01	<0,006	0,03	<0,01	67,58	0,1	<0,0015	371,4	0,02	<0,05	104,1	<0,01	<0,01	2470	<0,01	0,21	0,04
GPLB-3	57,59	<0,01	<0,006	0,02	<0,01	70,26	0,08	<0,0015	86,8	0,02	<0,05	21,1	<0,01	<0,01	576	<0,01	0,39	<0,03
GPLB-4	75,08	0,09	0,01	0,04	<0,01	91,60	0,1	<0,0015	173,4	0,02	<0,05	92,1	<0,01	0,04	1206	<0,01	0,32	2,24
LM-10	86,15	0,24	0,006	0,04	<0,01	105,10	0,13	<0,0015	82,1	0,02	<0,05	13,9	<0,01	0,08	527	<0,01	0,22	0,34
WP-1	64,47	0,01	0,006	0,01	<0,01	78,66	0,17	<0,0015	97,2	0,02	<0,05	39,1	<0,01	<0,01	717	<0,01	0,42	<0,03
LM-27	79,62	0,21	0,027	0,07	<0,01	97,14	0,14	<0,0015	81,2	0,02	<0,05	14,6	<0,01	0,07	556	<0,01	0,25	0,35
WE-2 (29 m)	90,51	<0,01	0,019	0,01	<0,01	110,41	0,02	<0,0015	76,6	0,02	<0,05	44,03	<0,01	<0,01	752	<0,01	0,46	2,95
WE-2 (60 m)	19,15	0,02	0,038	0,01	<0,01	23,36	0,23	<0,0015	118,8	0,02	<0,05	478,3	<0,01	<0,01	2290	<0,01	0,84	10,4
WE-2 (111 m)	18,45	0,01	0,029	0,01	<0,01	22,51	0,08	<0,0015	127,3	0,02	<0,05	504,7	<0,01	<0,01	2410	<0,01	0,76	4,78

Tabla N°4.8: Resultados hidroquímica del muestreo realizado por GP en Febrero de 2016 (continuación).

ID Monitoreo	Li	Mg	Mn	Hg	Mo	Ni	NO3	pH Lab	Ag	Pb	K	Se	Na	SDT	SST	SO4	V	Zn	BI_Lab
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(-)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	%
PZL-1	0,01	12,1	0,1	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,21	0,04	0,014	1,45	<0,004	8,14	280	37	126,6	0,01	0,48	1,12
LM-42 (QUEBRADA ROCO)	0,01	9,89	0,08	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	8,7	0,02	<0,003	1,21	<0,004	7,21	380	<10	161,9	0,01	<0,01	3,6
LM-51 (ZANJA ROCO)	0,01	10,8	0,02	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,62	0,05	<0,003	1,19	<0,004	7,74	290	<10	127,3	0,01	<0,01	4,64
LM-31	0,05	40,7	0,12	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	8,03	0,03	<0,003	2,27	<0,004	24,3	700	<10	464,6	0,02	0,02	0,1
MNB-4A	0,04	41,8	0,05	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,14	0,05	<0,003	2,29	<0,004	24	655	19	376,2	0,03	0,12	4,32
MNB-4B	0,04	42,6	0,14	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	6,68	0,04	<0,003	2,4	<0,004	23,9	685	<10	439,5	0,03	0,07	1,26
MNB-4C	0,04	42,1	0,42	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	6,68	0,05	<0,003	2,42	<0,004	26,2	710	10	445	0,04	0,13	2,3
MNL-3A	0,02	22,8	0,02	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,81	0,03	<0,003	1,21	<0,004	13,6	320	<10	100,7	0,02	0,02	4,31
GPLB-5	-	1673	0,57	-	-	-	20,1	-	-	-	1752	-	304	-	-	1724,7	-	-	-
GPLB-1	0,02	36	<0,01	<0,001	0,7	<0,01	7,1	8,68	0,03	<0,003	60,1	<0,004	210,6	2080	13	1316,3	0,01	<0,01	4,61
LM-56	<0,01	2,4	<0,01	<0,001	0,66	<0,01	10,6	11,1	0,03	<0,003	53,2	<0,004	170	2130	13	1284,8	<0,01	0,1	3,38
LM-49	0,04	84,4	1,62	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,29	0,03	<0,003	13,6	<0,004	170,2	2650	<10	1567,2	0,03	<0,01	3,44
PRLB-1	0,11	87,5	<0,01	<0,001	0,01	<0,01	<0,5	7,4	0,03	<0,003	3,21	<0,004	96,1	1950	<10	1159,2	0,06	0,08	3,15
PRLB-2	0,08	113	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,39	0,02	<0,003	4,24	<0,004	127,5	2260	<10	1341,6	0,04	0,48	0,36
PRLB-3	0,16	99,1	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	7,1	7,58	0,02	<0,003	2,6	<0,004	101,3	2060	<10	1245,5	0,1	0,03	5,53
PRLB-4	0,24	107	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	7,9	7,53	0,03	<0,003	3,88	<0,004	148,8	2360	<10	1487,8	0,14	0,02	4,78
PRLB-5	0,12	92,5	<0,01	<0,001	0,03	<0,01	<0,5	7,33	0,03	<0,003	3,65	<0,004	105,4	1940	10	1198,3	0,07	0,02	3,53
PRLB-6	0,08	111	<0,01	<0,001	0,02	<0,01	8,2	7,4	0,02	0,005	4,3	<0,004	114,4	2350	<10	1387,9	0,05	<0,01	4,94
PRLB-7	0,13	108,1	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	8,2	7,52	0,04	<0,003	3,21	<0,004	91,9	2060	<10	1296,9	0,09	0,02	5,17
PRLB-8 (43 m)	0,07	117,5	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	11,5	7,35	0,03	<0,003	2,8	<0,004	103,6	2150	15	1324,6	0,04	<0,01	1,17
PRLB-8 (87 m)	0,13	33,9	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	6,9	8,25	0,01	<0,003	0,67	<0,004	343,1	1450	<10	777,3	0,04	<0,01	4,22
PRLB-9	0,08	122,8	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,59	0,02	<0,003	1,39	<0,004	101,9	2230	<10	1471,9	0,04	<0,01	5,01
P2-TR	0,06	98,9	<0,01	<0,001	0,09	<0,01	<0,5	7,32	0,03	<0,003	5,48	<0,004	118,8	2280	15	1410,3	0,03	<0,01	3,47
POB-8A	0,01	90,7	0,02	<0,001	<0,01	<0,01	11,3	7,37	0,03	<0,003	3,13	<0,004	90,4	2030	58	1175,1	<0,01	<0,01	4,68
GPLB-2	0,17	100,1	<0,01	<0,001	0,01	<0,01	10,3	7,72	0,04	<0,003	2,83	<0,004	79,3	1850	<10	1102	0,09	<0,01	3,91

ID Monitoreo	Li	Mg	Mn	Hg	Mo	Ni	NO3	pH Lab	Ag	Pb	K	Se	Na	SDT	SST	SO4	V	Zn	BI_Lab
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(-)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	%
MNB-5A	0,04	55,2	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	5,5	7,71	0,01	<0,003	1	<0,004	45,5	900	<10	475,3	0,04	0,01	4,59
MNB-5B	0,06	103,4	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	13,8	7,27	0,03	<0,003	3,22	<0,004	83,2	2010	<10	1190,5	0,04	<0,01	4,28
MNB-5C	0,03	91	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	11,8	7,33	0,03	<0,003	4,11	<0,004	82,5	1860	<10	1062,6	0,05	<0,01	2,95
BRW-2	0,08	78,3	<0,01	<0,001	0,02	<0,01	6,4	7,61	0,02	<0,003	2,05	<0,004	54,9	1430	<10	790	0,07	<0,01	2,14
BRW-1	0,1	93,2	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	10,5	7,46	0,03	0,017	3,03	<0,004	74,8	1750	<10	1020,4	0,07	0,03	3,31
PBB-1	0,06	130,6	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	7,8	7,48	0,02	<0,003	4,38	<0,004	85,1	2020	14	1248,9	0,03	<0,01	2,25
POB-8B	0,06	112,8	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	11,2	7,86	<0,01	<0,003	4,17	<0,004	81,5	2020	<10	1141,6	0,03	<0,01	2,86
MNB-6A	0,05	35,9	0,01	<0,001	0,02	<0,01	4,3	8,06	0,01	<0,003	1,77	<0,004	32,8	700	<10	274,2	0,1	<0,01	4,4
MNB-6B	0,04	22,3	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	4,4	7,52	0,04	<0,003	1,11	<0,004	21,3	520	<10	177,5	0,03	0,01	4,04
POB-7A	0,06	113,9	0,02	<0,001	<0,01	<0,01	10,3	7,62	<0,01	<0,003	4,03	<0,004	56,7	1950	12	1147,8	0,03	<0,01	4,04
GPLB-3	0,02	25,4	0,03	<0,001	0,01	<0,01	3,5	7,31	<0,01	<0,003	2,52	<0,004	20,7	360	<10	238,9	0,01	<0,01	4,3
GPLB-4	0,04	45,8	0,26	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	6,87	<0,01	<0,003	2,68	<0,004	40,9	750	10	426,5	0,02	0,03	4,72
LM-10	0,01	19,4	0,11	<0,001	0,01	<0,01	14	8,04	0,01	<0,003	1,05	<0,004	10,1	410	<10	188,6	0,06	0,14	0,86
WP-1	0,03	30,8	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	12	7,71	0,01	<0,003	2,57	<0,004	32,8	560	<10	272,2	0,02	<0,01	3,65
LM-27	0,03	20,1	0,11	<0,001	<0,01	<0,01	13,3	7,84	0,01	<0,003	1,04	<0,004	11,1	400	<10	190,9	0,07	0,09	0,19
WE-2 (29 m)	0,02	23,3	0,04	<0,001	<0,01	<0,01	<0,5	7,75	0,02	<0,003	1,24	<0,004	66,3	560	<10	232,9	0,02	<0,01	4,55
WE-2 (60 m)	0,07	1,47	0,05	<0,001	0,04	<0,01	8,6	8,53	0,01	<0,003	1,18	<0,004	435,9	1620	20	454,3	0,17	<0,01	3,23
WE-2 (111 m)	0,04	1,65	0,02	<0,001	0,01	<0,01	6,9	8,61	0,01	<0,003	1,26	<0,004	478,7	1750	39	479,9	0,13	<0,01	5,06

4.2.2 Isótopos

El análisis de Oxígeno-18 y Deuterio del agua se realizó en el laboratorio de isótopos ambientales de la Universidad de Waterloo (Canadá). En el mismo laboratorio se analizaron el Azufre-34 y el Oxígeno-18 de los sulfatos. Los resultados se presentan en la **Tabla N°4.9** para la primera campaña y en la **Tabla N°4.10** para la segunda.

Tabla N°4.9: Resultados isótopos del muestreo realizado por GP en Septiembre de 2015.

ID Monitoreo	$\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$	$\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$	$\delta^{34}\text{S-SO}_4$	$\delta^{18}\text{O-SO}_4$
	‰ VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$	‰ VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	‰ VCDT $\pm 0,3\text{‰}$	‰ VSMOW $\pm 0,5\text{‰}$
LM-31	-82	-11,2	-1,2	1,2
MNB-4A	-83	-11,3	-0,6	3,6
MNB-4B	-83	-11,2	-0,2	3,6
MNB-4C	-82	-11,0	-0,5	3,8
MNL-3A	-85	-11,5	-2,8	3,7
GPLB-1	-78	-9,3	-2,3	-3,5
LM-56	-79	-9,7	-1,9	-7,2
PZLB-2	-90	-11,7	0,1	-0,2
PZLB-1A	-80	-10,0	1,2	-1,5
PZLB-1B	-79	-9,7	-1,9	-4,5
PZLB-1C	-78	-9,6	-2,3	-6,4
LM-49	-78	-9,6	-1,4	-6,9
PRLB-1 (21 m)	-79	-9,7	-2,8	-6,5
PRLB-1 (42 m)	-80	-9,7	-1,9	-6,9
PRLB-2 (26 m)	-79	-9,6	-2,2	-6,4
PRLB-2 (49 m)	-78	-9,6	-2,6	-6,6
PRLB-3 (25 m)	-79	-9,7	-2,4	-6,6
PRLB-3 (40 m)	-79	-9,8	-1,8	-6,2
PRLB-3 (60 m)	-79	-9,7	-1,7	-5,1
POB-8A	-78	-9,6	-2,4	-6,4
PRLB-7 (48 m)	-79	-9,7	-2,8	-6,7
PRLB-7 (90 m)	-80	-9,8	-3,1	-6,6
PRLB-7 (123 m)	-79	-9,9	-2,3	-6,8
GPLB-2	-78	-9,6	-3,0	-6,8
PRLB-8 (30 m)	-80	-10,0	-2,5	-6,7
PRLB-8 (70 m)	-83	-10,9	-1,5	-4,8
PRLB-8 (85 m)	-81	-10,2	-2,1	-5,6
MNB-5A	-84	-11,0	-2,1	-3,9
MNB-5B	-81	-10,3	-3,2	-6,1
MNB-5C	-79	-10,0	-2,7	-6,2
BRW-2	-82	-10,4	-2,6	-5,7
BRW-1	-80	-9,9	-2,3	-6,5
PBB-1	-80	-9,8	-2,3	-6,7
POB-8B	-80	-9,8	-3,2	-6,9
POB-7B	-80	-9,9	-3,1	-6,5
PBB-7 (28 m)	-80	-9,9	-2,5	-6,4
PBB-7 (47 m)	-80	-10,2	-2,5	-6,2
MNB-6A	-83	-10,7	-2,4	-5,3
MNB-6C	-83	-10,5	-1,7	-4,5
MNB-6B	-80	-10,1	-3,4	-6,8
POB-7A	-83	-10,7	-1,8	-5,9

Tabla N°4.10: Resultados isótopos del muestreo realizado por GP en Febrero de 2016.

ID Monitoreo	$\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$	$\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$	$\delta^{34}\text{S-SO}_4$	$\delta^{18}\text{O-SO}_4$
	‰ VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$	‰ VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	‰ VCDT $\pm 0,3\text{‰}$	‰ VSMOW $\pm 0,5\text{‰}$
PZL-1	-85	-11,5	-1,0	-0,9
LM-42 (QUEBRADA ROCO)	-85	-11,2	-0,7	0,6
LM-51 (ZANJA ROCO)	-85	-11,5	-1,0	1,2
LM-31	-79	-10,5	-0,2	3,0
MNB-4A	-83	-11,4	0,0	-10,2
MNB-4B	-83	-11,3	-1,3	7,1
MNB-4C	-83	-11,2	-0,4	3,2
MNL-3A	-85	-11,5	1,3	5,0
GPLB-5	-80	-10,0	-2,6	-5,9
GPLB-1	-71	-7,7	-3,0	-6,6
LM-56	-72	-8,3	-3,0	-6,5
LM-49	-72	-8,1	-3,2	-7,7
PRLB-1	-78	-9,6	-2,1	-5,6
PRLB-2	-79	-9,6	-2,2	-7,1
PRLB-3	-79	-9,6	-2,2	-6,2
PRLB-4	-78	-9,6	-2,3	-6,8
PRLB-5	-77	-9,3	-2,1	-7,2
PRLB-6	-75	-8,3	-3,1	-7,5
PRLB-7	-79	-9,8	-2,2	-7,2
PRLB-8 (43 m)	-78	-9,5	-2,2	-6,6
PRLB-8 (87 m)	-82	-10,5	-1,8	-5,2
PRLB-9	-78	-9,7	-3,4	-6,9
P2-TR	-76	-9,2	-3,0	-8,3
POB-8A	-77	-9,4	-2,3	-7,2
GPLB-2	-79	-9,7	-2,1	-6,9
MNB-5A	-84	-11,0	-1,8	-4,1
MNB-5B	-78	-9,5	-2,4	-6,6
MNB-5C	-78	-9,2	-2,3	-6,8
BRW-2	-81	-10,2	-1,8	-6,1
BRW-1	-79	-9,4	-2,8	-6,9
PBB-1	-79	-9,8	-2,7	-6,9
POB-8B	-80	-9,7	-2,8	-7,3
MNB-6A	-87	-11,4	-1,8	-1,9
MNB-6B	-89	-12,2	-0,2	0,2
MNB-6C	-92	-12,1	1,8	3,3
POB-7A	-79	-9,4	-2,4	-7,0
GPLB-3	-93	-13,0	-2,3	-3,4
GPLB-4	-88	-11,9	-4,5	-2,9
LM-10	-93	-13,3	0,8	-3,5
WP-1	-91	-12,8	1,2	-1,1
LM-27	-93	-13,4	0,7	-3,7
WE-2 (29 m)	-89	-12,0	1,2	1,3
WE-2 (60 m)	-83	-10,4	4,3	8,0
WE-2 (111 m)	-83	-10,2	4,3	8,1

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO

5.1.1 Definición de las Unidades Hidrogeológicas

De acuerdo a la revisión de antecedentes, el sistema hidrogeológico de la quebrada La Brea está caracterizado por 3 unidades hidrogeológicas:

- i. **Sedimentos No Consolidados de Alta Permeabilidad:** Corresponde a sedimentos no consolidados del cuaternario, de tipo aluvial-coluvial conformado por gravas y arenas gravosas intercaladas con estratos o lentes arcillosos. Se ubican principalmente en la zona central del valle donde pueden presentar potencias de 50 m cercano al pie del muro (sondaje PZLB-1A) y hasta 69 m en la confluencia de la quebrada La Brea y el río Ramadillas (sondaje POB-7A). Los sedimentos ubicados en las faldas de los cerros presentan espesores que varían entre 3 y 15 m.

De acuerdo a las pruebas de bombeo realizadas en el sedimento aluvial, esta unidad presenta una media a alta permeabilidad.

- ii. **Roca Meteorizada o Fracturada de Baja Permeabilidad:** Está conformada por una secuencia de rocas volcano-sedimentarias pertenecientes a las formaciones La Ternera (lavas) y Lagunillas (areniscas, conglomerados, andesitas), de edades triásica y jurásica, respectivamente. Las rocas triásicas afloran en todo el sector del depósito de lamas y al costado sur del muro en una franja norte-sur. Las rocas jurásicas poseen la mayor extensión areal aflorando en toda la quebrada La Brea. En los sondeos, se reconoce en el pozo PZLB-01B (entre los 44 y 70 m, zona de falla), ubicado en el pie del depósito La Brea (estribo derecho), POB-7B (desde los 34 m), ubicado en la confluencia de la quebrada la Brea y el río Ramadillas, y en el pozo PRLB-8 (desde los 51 m), situado al costado de la zanja cortafuga.

Estas rocas poseen una baja permeabilidad primaria, la que aumenta asociada a fracturas (diaclasas), zonas de falla, meteorización, etc. La magnitud de la permeabilidad secundaria es media a baja, la cual varía de acuerdo con el grado de fracturamiento y/o meteorización, con la textura y grado de cementación.

- iii. **Basamento Granítico:** Corresponde a rocas graníticas a sienograníticas de edad paleozoica, de color gris anaranjado a rosado, de grano medio a grueso. Aflora principalmente al Este

del depósito de lamas y hacia el Sur-Oeste del muro. Se registra en los pozos PZLB-1A (desde los 60 m) y PZLB-02 (desde los 36 m), ubicados al pie del muro. El Basamento Granítico se considera impermeable y en zonas de fallas y fracturas, su permeabilidad es muy baja.

En la **Figura N°5.1** se observan estas unidades hidrogeológicas considerando el Mapa Geológico (Schlumberger, 2016).

5.1.2 Geometría de las Unidades Hidrogeológicas

Para describir la geometría de las Unidades Hidrogeológicas se considera tanto la estratigrafía de los pozos, el análisis de sulfatos, como los perfiles geofísicos. La estratigrafía se debe procesar junto con la habilitación de los pozos para tener claro desde qué unidad hidrogeológica se están extrayendo las muestras. Esta información se encuentra en resumida en la **Figura N°5.2**, sin embargo, en la revisión de la estratigrafía de los pozos se observa que en algunas descripciones la secuencia de areniscas se ha considerado como parte de la Unidad de Sedimentos No Consolidados, lo cual genera incertidumbres tanto en la continuidad areal de esas unidades como en las direcciones preferenciales de los flujos subterráneos.

Por lo anterior, se definen sectores preferenciales de flujo asociado a las bajas resistividades registradas en los perfiles geofísicos, las cuales coinciden con las altas concentraciones de sulfatos medidas en los pozos de monitoreo. En la **Figura N°5.3**, se muestra la ubicación de 5 perfiles de tomografía (Geodatos, 2015), 3 perfiles geofísicos de tomografía ubicados en el sector del muro del tranque (Arcadis, 2016) y la ubicación de los pozos con información estratigráfica.

Los perfiles geofísicos de tomografía eléctrica permiten caracterizar al menos los primeros 50 a 60 m de profundidad, por lo cual, en algunos de ellos se carece de información respecto de la Roca Fracturada y del Basamento Granítico.

Cabe señalar que en los perfiles de Geodatos, al parecer existe un error de al menos 30 m en la cota de las estaciones. Esto al comparar las cotas de los perfiles con las de la imagen de Google Earth y las cotas de los pozos que cuentan con esta información.

Tomando en consideración lo anterior, se describen las vías preferenciales del flujo subterráneo tanto en la Unidad Sedimentos No Consolidados como en la Roca Fracturada desde el sector del muro hacia aguas abajo, hasta la junta entre la quebrada La Brea y el río Ramadillas.

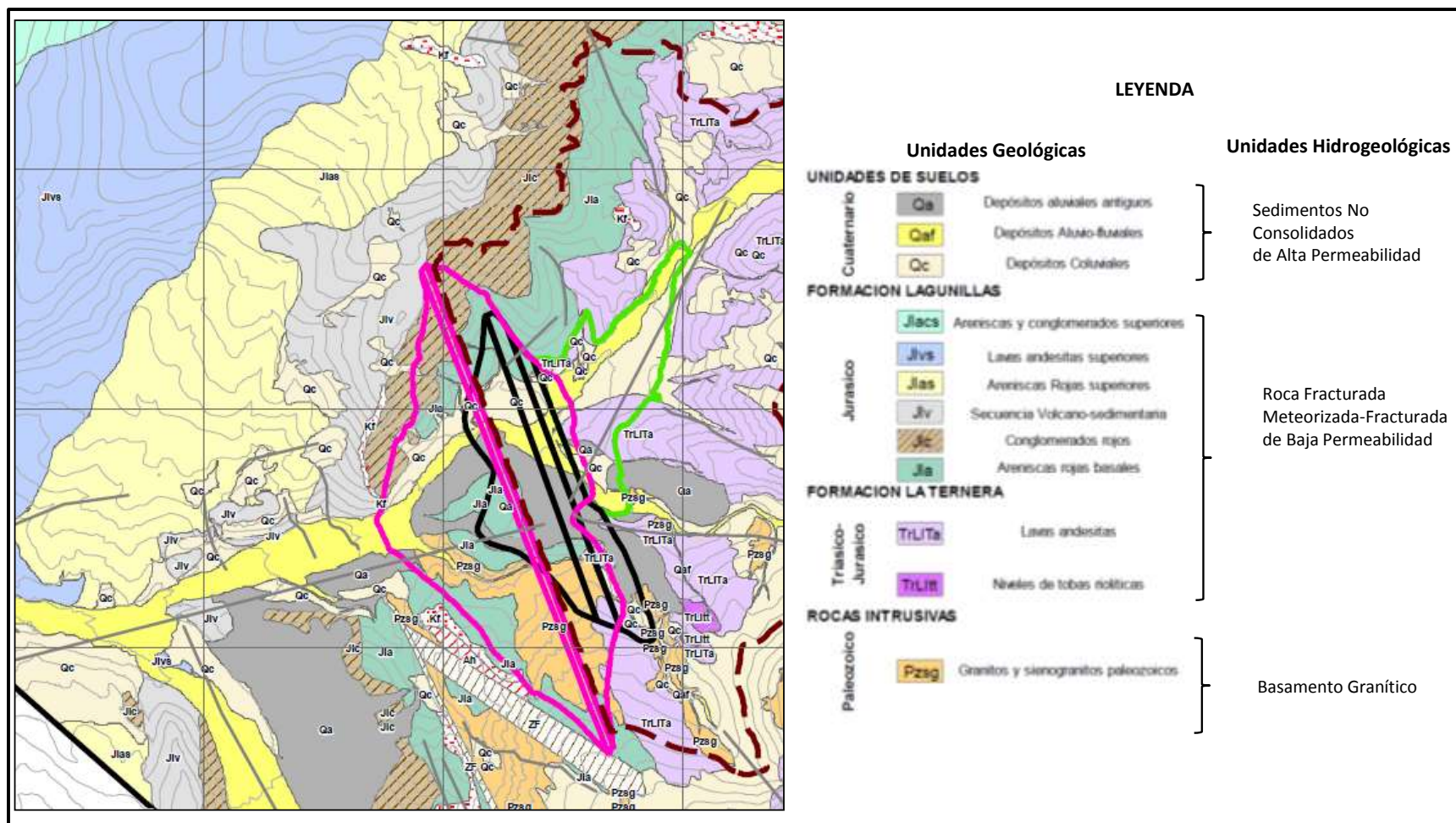


Figura N°5.1: Mapa Geológico- Hidrogeológico (Fuente: Mapa Geológico Schlumberger, 2016).



Figura N°5.2: Pozos con información estratigráfica separados por unidad hidrogeológica en la cual está habilitado.

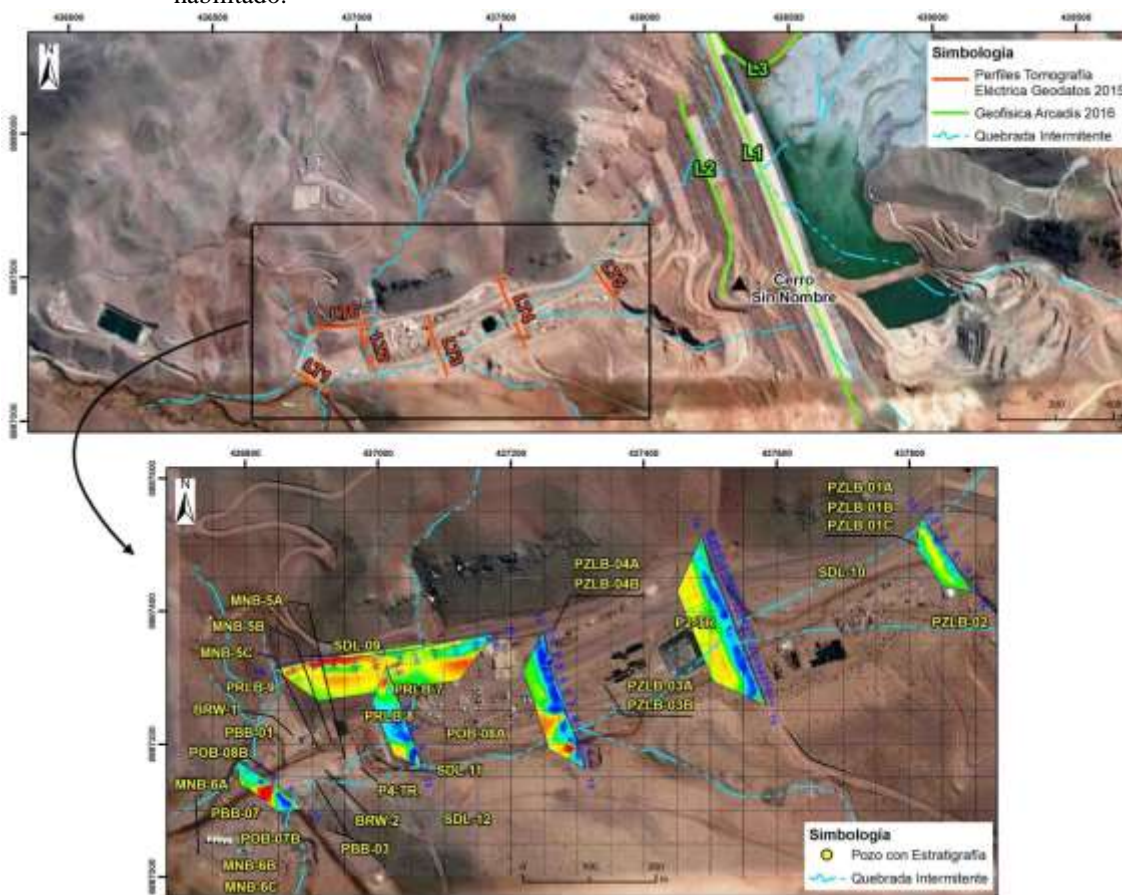


Figura N°5.3: Ubicación de perfiles geofísicos y pozos con información estratigráfica.

- ✓ En el sector del muro del tranque (perfil L1, Arcadis), se identifican dos vías preferenciales de infiltración: la primera ubicada en el estribo derecho o Norte, correspondiente a una anomalía de baja resistividad en la Unidad de Roca Fracturada o Meteorizada. La segunda en el sector del cerro Sin Nombre, probablemente desarrollada en la Unidad de Depósitos No Consolidados (ver **Figura N°5.4**).

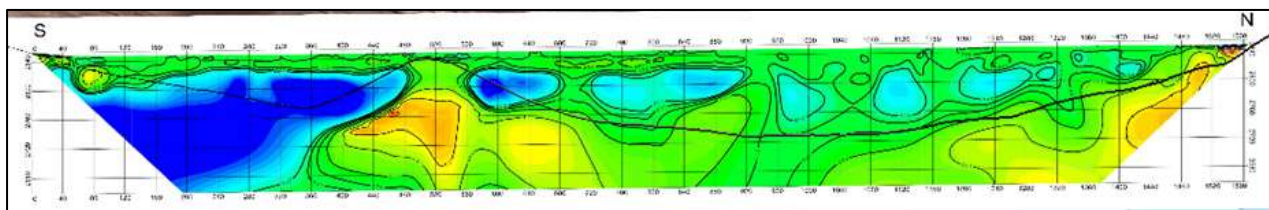


Figura N°5.4: Perfil L1. La línea de color negro indica el nivel de terreno (Fuente: Arcadis, 2016).

- ✓ Hacia aguas abajo, en el sector en donde se sitúan el multipiezómetro PZLB-1 y el pozo PZLB-2, se encuentra el perfil de tomografía T5 (L5), realizado por Geodatos. Se proyectan ambos pozos, el pozo PZLB-2 está ubicado inmediatamente al Sur, fuera del perfil (ver **Figura N°5.5**).

Se observa, que la anomalía de baja resistividad registrada en el estribo derecho presenta continuidad hacia este sector coincidiendo con las altas concentraciones de sulfatos registradas en las líneas del multipiezómetro. Las concentraciones de SO_4 tienden a ser mayores en el aluvial (PZLB-01C), con valores entre 1.200 y 1.500 mg/L, y menores en el Basamento (PZLB-01A), con valores predominantes entre 400 y 800 mg/L (Arcadis, 2016). El piezómetro PZLB-1B instalado en la Unidad Roca Fracturada registra un ascenso en la concentración de sulfato oscilando entre un mínimo de 283 mg/L y un máximo de 1.297 mg/L (Schlumberger, 2016).

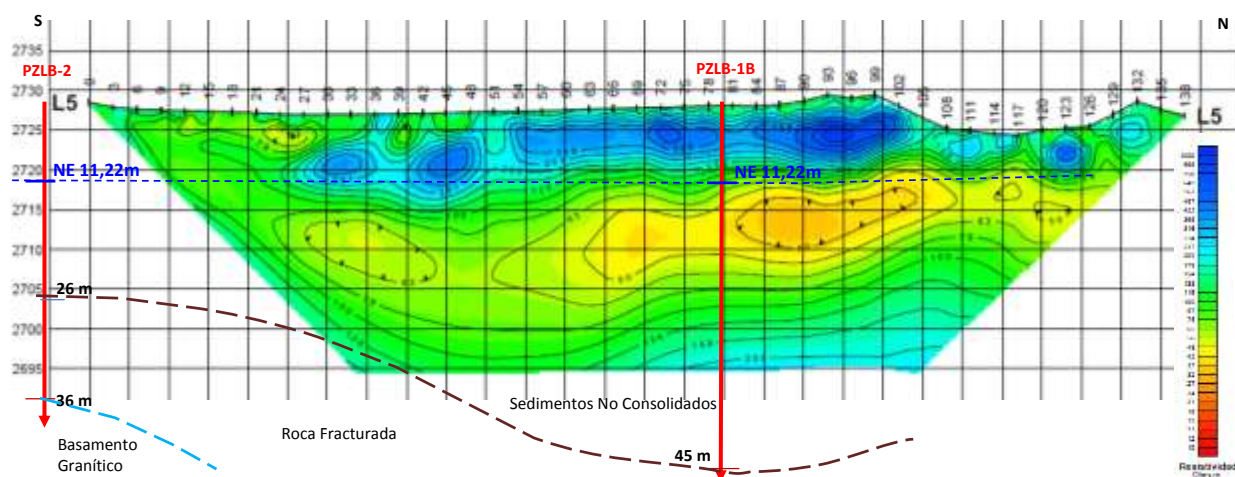


Figura N°5.5: Perfil T5 (L5). Se proyecta nivel de agua subterránea de Septiembre, 2015.

Bajo las estaciones 24 al 42 se registra una baja resistividad que se puede correlacionar con la registrada en el perfil anterior en el sector del cerro Sin Nombre. El pozo PZLB-2 está ranurado sólo en roca, sin registrar altas concentraciones de sulfatos (varían entre 67 y 267

mg/L, Schlumberger, 2016). Se desconoce si existe un flujo preferencial con altas concentraciones de sulfatos en la unidad de sedimentos no consolidados, ya que no existen pozos habilitados en dicha unidad.

Considerando la profundidad a la cual se registra el basamento granítico, 70 m en el multipiezómetro PZLB-1 y 36 m en el pozo PZLB-2, el sector Norte de la quebrada presenta una mayor potencia de sedimentos no consolidados y roca fracturada, por lo cual el flujo principal sería por el sector Norte, en donde se evidencian altas concentraciones de sulfatos en esas dos unidades.

Sin embargo, por el sector Sur de la quebrada La Brea no es posible descartar o confirmar una segunda vía preferencial de sulfatos por Sedimentos, ya que no se disponen de datos (ver **Figura N°5.5**). En la Roca Fracturada no se registra alta concentración de sulfatos.

- ✓ Hacia aguas abajo, se ubica el pozo SDL-10, el cual registra el Basamento Granítico a los 30 m de profundidad. Este alzamiento del basamento continuaría en profundidad hacia el sector Norte aflorando en dicha ladera correspondiente a la unidad geológica Kd (intrusivo hipabisal; Mapa Geológico Arcadis, 2016)). Al observar el perfil TEM N7 (Geodatos, 2016), se verifica que en el sector Norte la roca se encontraría entorno de los 15 m de profundidad, mientras que, al Sur se encontraría a más de 50 m de profundidad. Por lo cual, el flujo preferencial tendría una dirección preferencial hacia la vereda Sur desviado por la presencia de este dique granítico. En este sector no se tienen mediciones de sulfatos.
- ✓ Hacia aguas abajo se dispone del perfil de Tomografía T4 (L4), realizado por Geodatos. Se proyecta el pozo P2-TR con información estratigráfica. Este pozo registra la Unidad Sedimentos No consolidados hasta los 26 m y bajo ésta, la Unidad Roca Fracturada hasta los 122 m, sin alcanzar el Basamento Granítico (ver **Figura N°5.6**).

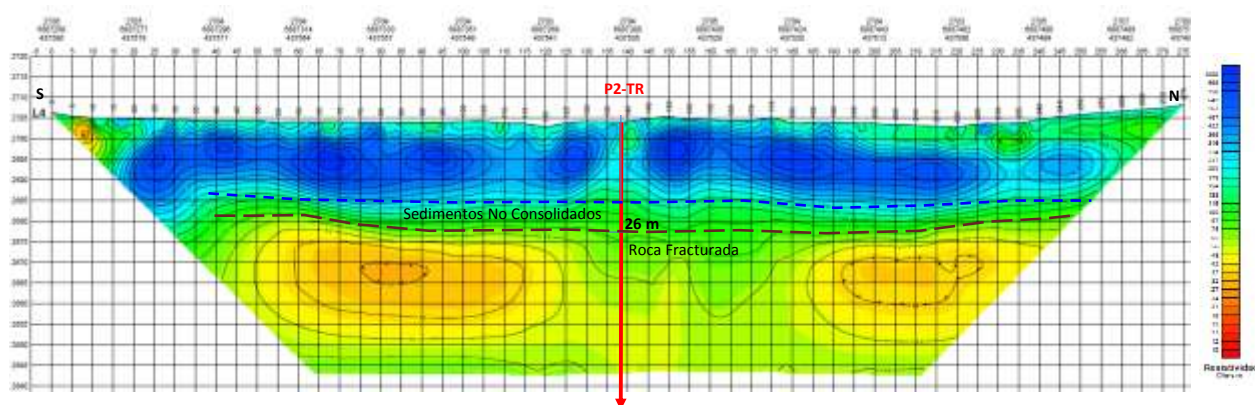


Figura N°5.6: Perfil T4 (L4). Se proyecta nivel de agua subterránea de Noviembre, 2015.

Al proyectar en el perfil de tomografía T4, el nivel de las aguas subterráneas (línea de color azul) y el contacto Sedimentos No Consolidados-Roca Fracturada, se infiere que existen 2 sectores con anomalías de baja resistividad distribuidas tanto en el sector Norte como en el Sur, principalmente en Roca Fracturada (ver **Figura N°5.6**).

Se desconoce la habilitación de este pozo, sin embargo presenta altas concentraciones de sulfatos (entorno de los 1.710 mg/L), probablemente en Roca Fracturada. De acuerdo al perfil pudiesen existir dos flujos preferenciales en roca fracturada, siendo por el sector Sur el flujo principal.

- ✓ Hacia aguas abajo, se sitúa el perfil de tomografía T3 (L3), realizado por Geodatos. En este perfil se proyectan los multipiezómetros PZLB-3A y 3B; PZLB-4A y 4B, con información estratigráfica. Se observa un aumento en la potencia de los Sedimentos No Consolidados variando de 34 m en el sector Norte y a más de 55 m en el sector Sur. Este perfil registraría sólo la Unidad Sedimentos No Consolidados (ver **Figura N°5.7**).

El piezómetro PZLB-3A instalado en Roca Fracturada, presenta registros de la concentración de sulfato entre un mínimo de 170 mg/L y un máximo de 258 mg/L. El piezómetro PZLB-4A también instalado en Roca Fracturada, presenta registros entre un mínimo de 251 mg/L y un máximo de 363 mg/L. Por su parte, los piezómetros habilitados en los Sedimentos No Consolidados PZLB-3B y 4B registran concentraciones de sulfatos que varían entre 1.271 a 1.393 mg/L y 1.836 a 1.413 mg/L, respectivamente, es decir se observan mayores concentraciones por el sector Norte.

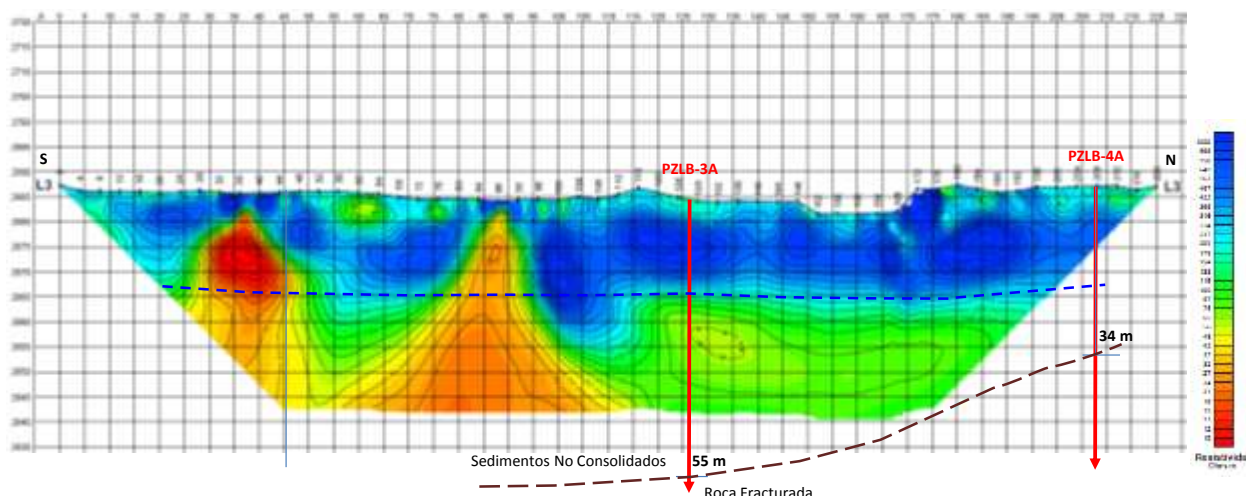


Figura N°5.7: Perfil T3 (L3). Se proyecta nivel de agua subterránea de Noviembre, 2015.

Al comparar esta información con el perfil de tomografía, se observa que la anomalía registrada en la cota 2.670 m snm (referencial) del sector Sur en el perfil T4 (unidad Roca Fracturada) coincide con las anomalías del perfil T3 (Sedimentos No Consolidados). Sin embargo no se tiene información estratigráfica entre ambos perfiles de tomografía o análisis de sulfatos que permitan concluir al respecto.

Además, en este perfil y a diferencia de los perfiles anteriores, se registran anomalías en la zona no saturada, por lo cual pudiese existir un aporte de humedad desde la superficie. Por ejemplo pudiera corresponder a alguna filtración desde la piscina ubicada entre los perfiles T4 y T3. Al observar una imagen de Google Earth del año 2013, se observa una tubería que conecta dicha piscina de aguas de proceso con la zanja corta fuga, que coincide con la anomalía registrada bajo las estaciones geofísicas 88-92. Asimismo, la anomalía registrada

entre las estaciones 36 a 40 coincide con un camino vehicular, el cual es regado constantemente (ver **Figura N°5.8**).

- ✓ Hacia aguas abajo de este perfil se ubica el perfil de tomografía T2 (L2), realizado por Geodatos. En este perfil se proyectan los pozos POB-8A y PRLB-7. Estos pozos están habilitados tanto en Sedimentos No Consolidados como en Roca Fracturada (ver **Figura N°5.9**). Cabe señalar, que el pozo PBRL-8 no se puede proyectar ya que se encuentra en un sector bajo, y para proyectarlo se requiere que las cotas estén validadas tanto la del pozo como la del perfil.

En este perfil se observan anomalías de baja resistividad en el sector no saturado, al igual que en el perfil T3. Las anomalías registradas coinciden nuevamente con la tubería (estación 39) y el camino (estaciones 6-15). La anomalía bajo las estaciones 135 a 141, pudiesen correlacionarse con la presencia de arcillas registradas en el pozo PRLB-7 entre los 11 y 14 m de profundidad (ver **Figura N°5.8**).



Figura N°5.8: Imagen de Google Earth 2013. Se indica la tubería y el camino vehicular junto con los Perfiles Geofísicos realizados por Geodatos.

En el sector medio del perfil se observan valores de resistividad mayor a la registrada en los extremos, generándose una discontinuidad en las unidades geoelectricas. Por esta razón, no

se interpola entre los niveles medidos en los pozos proyectados. Esos valores más resistivos pudiesen correlacionarse a roca más compacta, no fracturada, sin embargo no existen antecedentes estratigráficos en esta zona.

No obstante, al observar el drenaje superficial, las quebradas que se disponen en la ladera Norte al llegar al valle continúan por su borde Norte y la quebrada La Brea se dispone por la ladera Sur, es decir en la parte central del valle existe alguna barrera hidráulica (roca?) que origina que los drenajes escurran por el borde del valle en ambas laderas.

Considerando la anomalía bajo el nivel de las aguas subterráneas medido en el pozo POB-8A, sector Sur, pudiese existir un flujo preferencial por los Depósitos No Consolidados.

Respecto del sector Norte, el pozo PRLB-7 está habilitado tanto en Sedimentos No Consolidados como en Roca Fracturada. Considerando las mediciones de sulfatos de GP (medidos por GP en Septiembre de 2015) se registra presencia de sulfatos en la Unidad Roca Fracturada, entorno de los 1.300 mg/L.

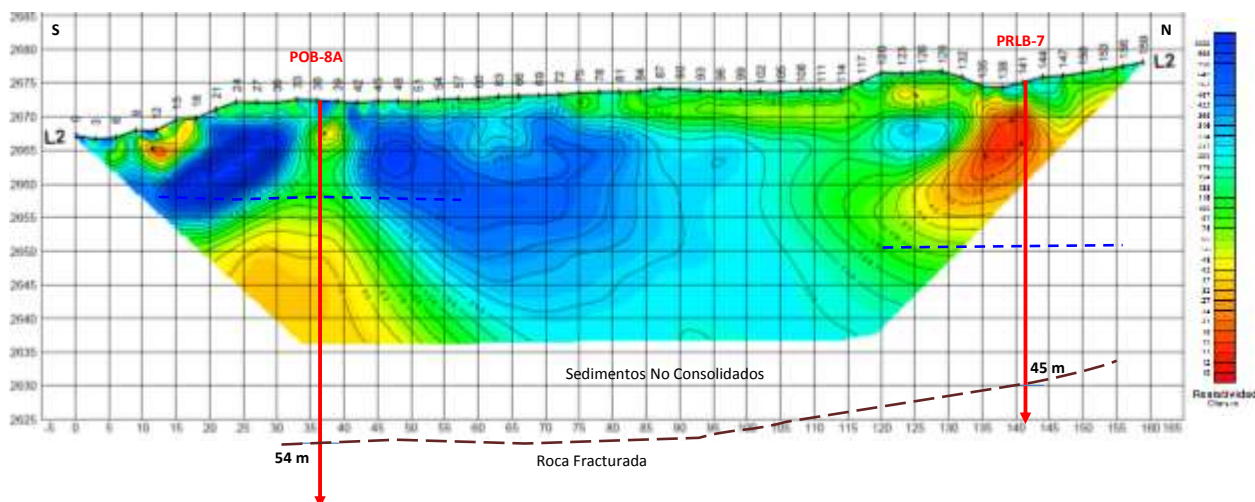


Figura N°5.9: Perfil T2 (L2). Se proyecta nivel de agua subterránea de Octubre, 2015.

Por lo cual, existiría continuidad por el sector Sur de las altas concentraciones de sulfatos registrada en la Unidad de Sedimentos No Consolidados y además, se tendría presencia de altas concentraciones de sulfatos por la Unidad Roca Fracturada.

- ✓ Hacia la ladera Norte y con dirección W-E, se dispone el perfil de tomografía T6 (L6), Geodatos. En este perfil se proyecta el pozo SDL-9 con información estratigráfica. De acuerdo a los perfiles anteriores se infiere el nivel estático, considerando además, el nivel de 24 m bnt registrado en el pozo PRLB-7 (ver **Figura N°5.10**).

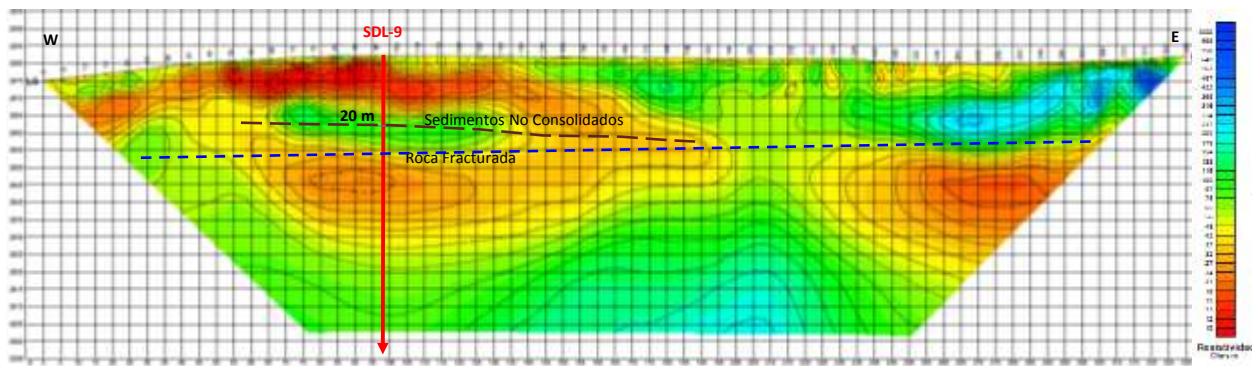


Figura N°5.10: Perfil T6 (L6). Se infiere el nivel de agua subterránea.

Se observa una anomalía de muy baja resistividad en el sector no saturado, probablemente asociado a material fino (arcillas) proveniente de los depósitos de la quebrada lateral que confluye a La Brea.

Bajo el nivel de las aguas se registran anomalías en la Unidad Roca Fracturada, por lo que probablemente se tendría un flujo preferencial por esta unidad.

Al igual que el perfil T2, se observan resistividades menores en superficie lo cual estaría asociado a aportes en superficie (colores verde y amarillo).

- ✓ Hacia aguas abajo se sitúa el perfil de tomografía T1 (L1), realizado por Geodatos. En este perfil se proyecta el pozo POB-8B, BRW-2, BRW-1 y PBB-1. De acuerdo con la información estratigráfica, este perfil sólo alcanza a registrar la Unidad de sedimentos No Consolidados (ver **Figura N°5.11**).

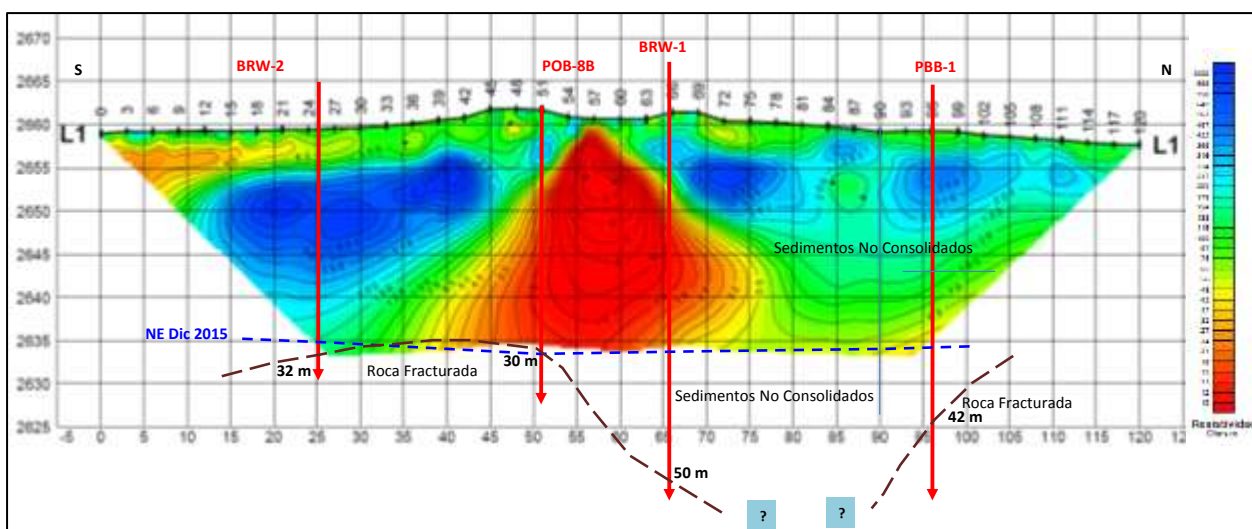


Figura N°5.11: Perfil T1 (L1). Se proyecta nivel de agua subterránea de Diciembre, 2015.

Se registra una anomalía de baja resistividad en el sector no saturado limitado por los pozos POB-8B y BRW-1, probablemente asociado a algún aporte proveniente desde aguas arriba (fuga desde la zanja cortafuga o tuberías del sistema de bombeo?). Cabe señalar, que en

este perfil se proyectó el nivel de aguas subterráneas de Diciembre de 2015, en donde se observa un sistema estabilizado, similar a la situación de Mayo. De acuerdo a lo visto en los otros perfiles, los valores de alta resistividad (color azul) corresponden a sedimentos secos, por lo cual el nivel estático pudiese estar unos 5 a 10 m más arriba durante la ejecución del perfil.

De acuerdo con el perfil no es posible interpretar si existe un flujo preferencial por la Roca Fracturada. Considerando el multipiezómetro MNB-5 ubicado a 17 m aguas arriba del BRW-2, y su data en el mes de Mayo de 2015, registra presencia de sulfatos que varían entre 800 y 1.000 mg/L en la Línea 5A, habilitado en Roca Fracturada. En la Línea 5B también habilitada en la Unidad Roca Fracturada (Formación Lagunillas, Arcadis, 2016) se registran valores de sulfatos entre 750 a 860 mg/L. En la Línea 5C, habilitada en Sedimentos No Consolidados registra valores de 1.100 a 1.270 mg/L. Por lo anterior, hacia el sector Sur se detecta la presencia de sulfatos en ambas Unidades.

Al comparar con los perfiles T6 y T2, se infiere que existen dos flujos preferenciales hacia los extremos del valle, tanto por Sedimentos No Consolidados como en Roca Fracturada. Sin embargo, dado que en algunos casos se ha descrito la Unidad Roca Fracturada (Arenisca roja) como Sedimentos No Saturados, no es posible identificar claramente cómo es el movimiento del flujo en esas unidades.

Considerando la información estratigráfica, entre los pozos BRW-1 y PBB-1 existe una mayor potencia de Sedimentos No Consolidados (Falla?). Por lo cual también se tendría un flujo preferencial por dicho sector, probablemente por ambas unidades

- ✓ Hacia el sector de la confluencia de la quebrada La Brea con el río Ramadillas, aguas abajo de los perfiles geofísicos y considerando el monitoreo (Mayo de 2015) de los pozos ubicados en ese sector, se observa que existe presencia de sulfatos tanto en la Unidad de Sedimentos No Consolidados como en la Unidad Roca Fracturada (Multipiezómetro MNB-6). Tomando como referencia el nombre de los pozos existentes en las Placas de Identificación en terreno, las líneas más someras (B y A) están habilitadas en la Unidad Sedimentos No Consolidados y tienen concentraciones de sulfatos entre 920 a 1.030 mg/L y 950 a 1.230 mg/L, respectivamente. La línea C estaría habilitada en Roca Fracturada registrando concentraciones de sulfatos que varían entre 440 y 1.090 mg/L.

Respecto de las descripciones estratigráficas, se identifican 2 tipos de Andesita: una Andesita que forma parte de la secuencia de areniscas y otra, que corresponde a una Andesita Triásica que sobreyace al Basamento Granítico. Esta última con características de impermeable, por lo tanto formaría parte del Basamento. Esta diferenciación no se efectúa, incluyendo siempre a la Andesita como parte de la Unidad Roca Fracturada.

Considerando que la Unidad Roca Fracturada (Secuencia de Arenisca y lavas andesíticas) presenta una permeabilidad secundaria asociada al control estructural del sector, en ninguno de los dos últimos estudios (Schlumberger y Arcadis, 2016) se definen lineamientos o estructuras que

permitan explicar el flujo por dicha unidad. De hecho, si la Arenisca no ha sido afectada por una estructura, su comportamiento será impermeable formando parte del Basamento.

Considerando la calibración de los perfiles geofísicos con la información estratigráfica, se tiene lo siguiente:

- Las altas resistividades (color azul) se correlacionan con Sedimentos No Consolidados muy secos y con el Basamento Granítico.
- Las resistividades medias (colores verdes y amarillos) son sectores saturados y/o con presencia de humedad.
- Las bajas resistividades (color anaranjado) estarían asociadas a altas concentraciones de sulfatos tanto en Sedimentos No Consolidados como en Roca Fracturada.
- Los valores de muy baja resistividad (color rojo) se correlacionan con la presencia de arcillas.

De acuerdo a la revisión de antecedentes, lo analizado en los perfiles y en la estratigrafía de los pozos, en la quebrada La Brea se tiene un acuífero del tipo libre desarrollado tanto en la Unidad Sedimentos No Consolidados como en la Roca Fracturada.

Hacia el sector del muro de Depósitos de Relaves se infiere que las anomalías geofísicas registradas en el sector Norte estarían asociadas a altas concentraciones de sulfatos en Roca Fracturada, mientras que hacia la ladera Sur se desarrollaría en los Sedimentos No Consolidados.

Hacia aguas abajo (perfil T5), en el sector Norte se observa continuidad de la Unidad Roca Fracturada y de la presencia de altas concentraciones de sulfatos en ella. Hacia el sector Sur, no se tienen datos para verificar si ocurre lo mismo en la Unidad de Sedimentos No Consolidados, sin embargo, no habría presencia de sulfatos por la Unidad de Roca Fracturada (PZLB-02).

Hacia el sector del pozo SDL-10, en la ladera Norte aflora un dique monzogranito, el cual se registra a los 15 m de profundidad en dicho pozo, generando una barrera hidráulica desviando el flujo principal hacia el sector Sur, en donde la potencia de los sedimentos alcanzarían hasta los 50 m de profundidad.

Hacia aguas abajo, en el sector del perfil T4, se registra la Roca Fracturada entorno de los 26 m de profundidad, en donde se tendría la presencia de altas concentraciones en dicha Unidad, tanto por el sector Norte como por el Sur.

Hacia el T3, se registra un aumento de la potencia de los Sedimentos No Consolidados, registrando 34 m hacia el Norte, mientras que hacia el Sur superaría los 55 m. Se evidencia presencia de sulfatos sólo en la Unidad Sedimentos No Consolidados por el sector Norte. Hacia el Sur no se tiene información. En esta zona se registran aportes de aguas superficiales probablemente asociadas a fugas de aguas de manejo industrial y/o riego de caminos.

Hacia el T2, sector de la zanja corta fugas, se presenta continuidad de esas anomalías en el sector no saturado probablemente asociado a aportes superficiales o fugas desde la zanja. Se observa continuidad de la presencia de sulfatos registrados por el sector Sur, en la Unidad de Sedimentos

No Consolidados. Por el Norte, se registran altas concentraciones de sulfatos tanto en la Unidad Sedimentos No Consolidados como en la Roca Fracturada.

Entre los perfiles T2 y T1, existen algunas inconsistencias respecto de las descripciones estratigráficas, ya que se infiere que existiría un alto del Basamento (Andesita Triásica) que origina en parte que los flujos preferenciales sean por los bordes del valle y en su parte central entre los pozos BRW-1 y PBB-1. Esta situación explicaría la presencia de altas concentraciones de sulfatos tanto en la Unidad de Sedimentos como en la Roca Fracturada en pozos ubicados aguas abajo de la confluencia de la quebrada La Brea con el río Ramadillas.

Por lo anterior, se concluye que existen sectores preferenciales tanto por la Unidad Sedimentos No Consolidados como por Roca Fracturada, evidenciado por la concentración de sulfatos registradas en ambas unidades desde el pié del depósitos de Lamas hasta aguas abajo de la confluencia de la quebrada La Brea con el río Ramadillas.

5.2 REVISIÓN DE LA BASE DE DATOS HIDROQUÍMICA

5.2.1 Datos Hidroquímicos Anómalos

En primer lugar se requiere identificar los datos anómalos de la base de datos. La metodología utilizada fue comparar todos los parámetros de calidad de los puntos muestreados e identificar aquellos cuya calidad no era posible de explicar por ningún fenómeno local o regional, sino que se debía evidentemente a una situación particular de la captación (verificado principalmente con las filmaciones de los pozos) y del desarrollo de los pozos.

A continuación se mencionan los puntos anómalos, junto con la justificación de su tratamiento para el análisis:

Campaña I:

- ♦ **Las líneas A y B del multipiezómetro PZLB-1.** El primer parámetro que salta a la vista es el pH. Los valores de pH están sobre 12, lo cual está muy por sobre cualquier valor medido en otro punto cercano (ningún pozo presenta un pH superior a 9). Sumado a esto, estas aguas tienen conductividades superiores a los 7000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual es muy alto en comparación con los otros pozos cercanos que tienen valores levemente superiores a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En particular, las concentraciones de los macroelementos sodio y carbonato son muy altas en comparación a lo observado en otros pozos cercanos. Este multipiezómetro había sido recientemente construido y debido a que su diámetro es de solamente 2 pulgadas, tuvo que ser muestreado con una válvula Waterra, la cual no permitió purgar toda el agua del pozo. Por lo anterior, se prevé que el desarrollo del pozo no fue bien terminado y existen aún restos de fluidos usados en la perforación o parte del sello. En conclusión, para los análisis hidroquímico e isotópico **se descartan** los puntos PZLB-1A y PZLB-1B, por no presentar aguas representativas del sistema acuífero.
- ♦ **El multinivel PZLB-2.** Se descarta del análisis ya que tiene aguas poco representativas del sector, lo cual se observa al analizar su marca química e isotópica. A diferencia de

las líneas A y B del multipiezómetro PZLB-1, el pH y la conductividad de este pozo no son anómalos, sin embargo, el agua de este piezómetro es del tipo bicarbonatada-cálcica, muy parecida al agua de la quebrada Roco (MNL-3A), y no a la de los pozos aguas abajo del depósito de lamas (sulfatada-cálcica). Respecto a la marca dada por los isótopos del agua, ésta es completamente distinta a la de cualquier otra agua muestreada. El problema radica en que, debido a su pequeño diámetro, no se pudo realizar una purga adecuada de este pozo al momento de su muestreo y, como estaba recientemente construido, probablemente a esa fecha aún presentaba aguas utilizadas en la perforación.

- ♦ **La línea C del multinivel PZLB-1.** Las aguas de este piezómetro son similares a las de otros pozos ubicados aguas abajo del depósito de lamas, sin embargo, debido a que se usó el mismo método de muestreo que las otras líneas del PZLB-1 y que el PZLB-2, se decide por consecuencia **descartar** esta muestra del análisis.
- ♦ **Los pozos de monitoreo POB-8A, POB-7B y PBB-7.** Presentan una gran cantidad de incrustaciones, que prácticamente tienen tapadas sus cribas. Esas incrustaciones son probablemente Carbonatos de Calcio. Estos 3 pozos son los que tienen mayores concentraciones de sólidos suspendidos totales, de fierro (todos sobre 10 mg/L) y de manganeso. Sumado a estos problemas, prácticamente no existe variación de los parámetros de terreno en la columna de agua de estos pozos, lo cual sería efecto de las importantes incrustaciones existentes. Por lo tanto, **se descartan** las muestras de agua tomadas en estos pozos **para el análisis hidroquímico**. Por otra parte, las incrustaciones no afectan la composición isotópica del agua, luego los datos isotópicos obtenidos en estas muestras serán usados en la sección de isótopos.
- ♦ **La muestra PRLB-8 (70m).** Según el perfilaje, esta muestra se encuentra dentro de una zona de baja conductividad eléctrica y de alto pH, condición que se repite luego en la segunda campaña. Estas muestras de agua no se descartan a priori, pero tal vez sea necesario hacerlo en algún análisis particular. De todas formas, los datos isotópicos obtenidos en estas aguas serán usados en la discusión de datos en la sección de isótopos.

Campaña II:

- ♦ **GPLB-5.** Esta muestra contenía muchos sedimentos ya que se trataba del sobrenadante de las lamas. Esto alteró la muestra haciéndola bastante distinta (en hidroquímica) al resto de las aguas del depósito de lamas. Por lo tanto la muestra no será utilizada en el análisis hidroquímico pero sí en el análisis isotópico.
- ♦ **El pozo de monitoreo P2-TR.** Este pozo se encontraba con muchas incrustaciones (probablemente Carbonatos de Calcio), las cuales tapaban las cribas por debajo del nivel de aguas. Pese a contener un agua casi transparente, debe existir una baja renovación de esta agua, lo que coincide con la baja variación de los perfiles de temperatura y conductividad. Debido a este estancamiento deben existir reacciones físico-químicas que alteran la calidad de agua del pozo. Se **descarta** esta muestra **para el análisis hidroquímico**, sin embargo se utiliza para el análisis isotópico.

- ♦ **El pozo de monitoreo POB-8A.** Por la misma razón por la cual se descartó la muestra en la primera campaña, se debe **descartar** esta muestra **para el análisis hidroquímico**. Sin embargo, el análisis isotópico es posible usarlo.
- ♦ **La muestra PRLB-8 (87m).** Al igual que en la muestra tomada a 70 m en la primera campaña, esta muestra tiene bajos valores de conductividad y altos valores de pH respecto al resto del pozo. Esta es una condición particular de este pozo, que esta vez ya había sido bombeado durante largo tiempo. Por lo anterior, no se puede descartar la muestra a priori, pero al momento de hacer el análisis hidroquímico será tratada considerando este antecedente que puede explicarse como una anomalía geológica o una alteración persistente provocada durante la perforación.

Tabla N°5.1: Resumen con las anomalías encontradas en los puntos de monitoreo.

ID Monitoreo	Anomalía	Descartado del Análisis	
		Hidroquímico	Isotópico
Campaña I			
PZLB-1A	pH y CE demasiado elevados	X	X
PZLB-1B	pH y CE demasiado elevados	X	X
PZLB-2	Aguas no representativas del sector	X	X
PZLB-1C	No se puede realizar purga	X	X
POB-8A	Gran cantidad de incrustaciones	X	
POB-7B	Gran cantidad de incrustaciones	X	
PBB-7	Gran cantidad de incrustaciones	X	
PRLB-8 (70m)	pH elevado y CE bajo	¿?	
Campaña II			
GPLB-5	Aguas muy diferentes a las otras aguas del depósito	X	
P2-TR	Gran cantidad de incrustaciones	X	
POB-8A	Gran cantidad de incrustaciones	X	
PRLB-8 (87m)	pH elevado y CE bajo	¿?	

5.2.2 Situación Anterior al Inicio Operación Depósito La Brea

Los datos de Conductividad Eléctrica y de concentración de sulfatos medidos en fechas anteriores al inicio de la operación del depósito de lamas (Mayo-2014 hacia atrás) se sintetizan en las **Figuras N°5.12 y N°5.13**.

Se observan mayores valores o concentraciones en la quebrada La Brea con respecto a la quebrada Roco. Las aguas de la quebrada La Brea presentaba una conductividad de 1044 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y concentración de sulfatos entre 489 y 623 mg/L , mientras que la quebrada Roco presentaba conductividades entre 358 y 583 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y sulfatos entre 50 y 171 mg/L .

En el sector ubicado aguas abajo del actual depósito de lamas, las aguas subterráneas presentaban valores de conductividad eléctrica entre 830 y 889 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de sulfato entre 288 y 314 mg/L , correspondiendo a valores intermedios entre las aguas de las quebradas La Brea y Roco.



Figura N°5.12: Conductividad Eléctrica de las aguas medidas en fechas anteriores al inicio de la operación del depósito de lamas (fines de 2013 a principios de 2014).

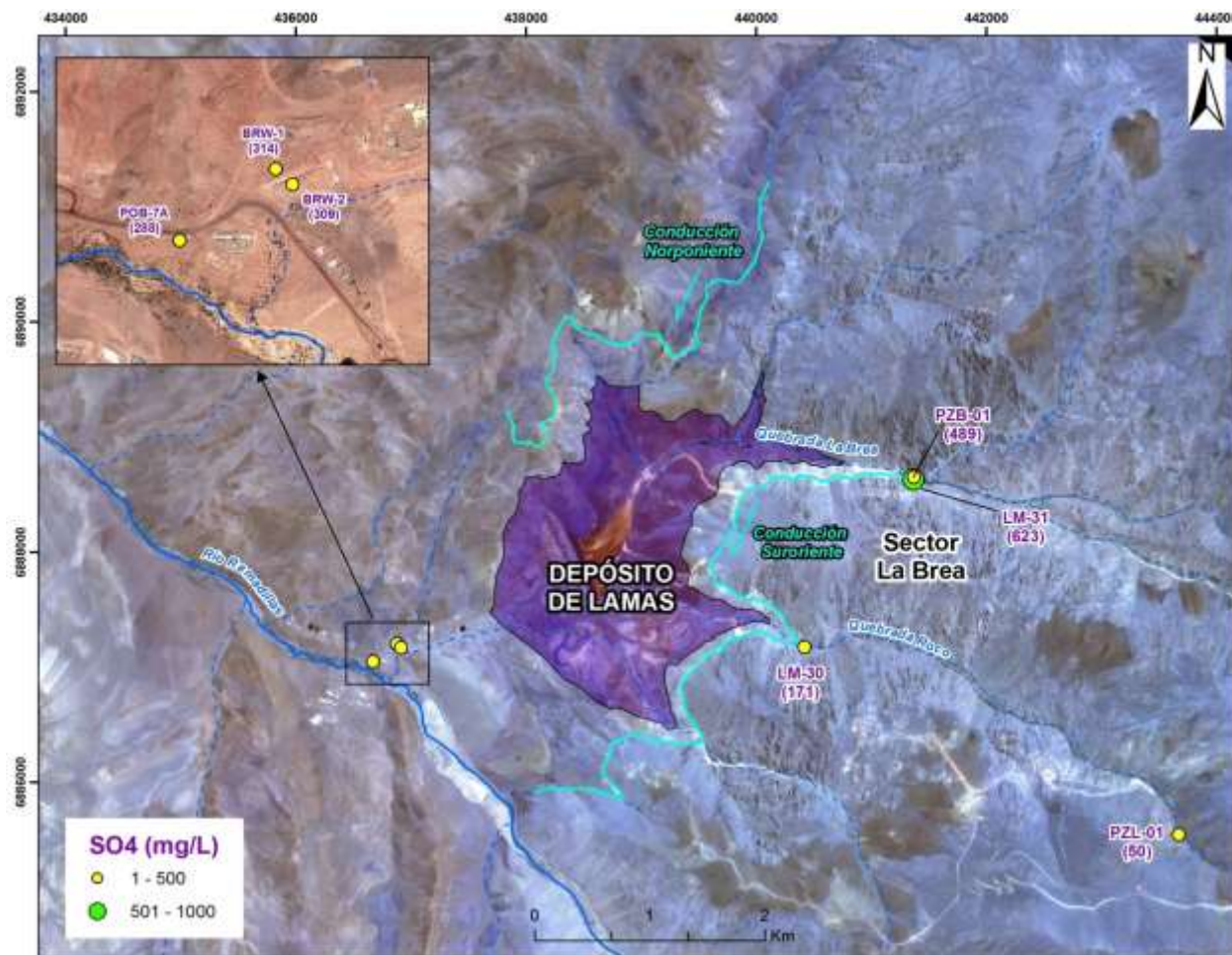


Figura N°5.13: Concentraciones de sulfato en las aguas medidas en fechas anteriores al inicio de la operación del depósito de lamas (fines de 2013 a principios de 2014).

Graficando en un diagrama de Piper los macroelementos de los puntos de monitoreo anteriores (ver **Figura N°5.14**), se aprecia una importante diferenciación en el tipo de aguas presente en las dos quebradas aportantes. La quebrada Roco tiene aguas bicarbonatadas-cálcicas y bicarbonatadas magnésicas, mientras la quebrada La Brea posee aguas sulfatadas-cálcicas. Se observa claramente la mezcla de los dos tipos de agua en las muestras de agua subterráneas que representan las condiciones de línea base antes de la operación del depósito de lamas.

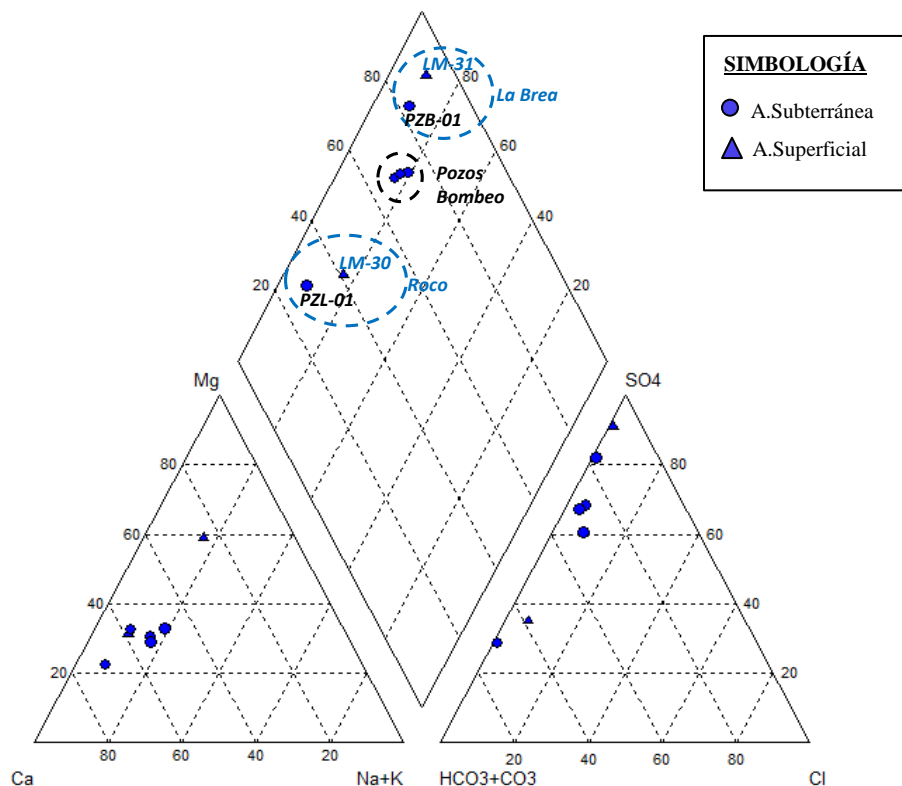


Figura N°5.14: Diagrama de Piper de las aguas del sector en estudio, monitoreadas en fechas anteriores al inicio de la operación del depósito de lamas (datos de fines de 2013 a principios de 2014).

5.2.3 Identificación de Tendencias Históricas

Se realiza un análisis comparativo entre los datos recolectados por GP en Septiembre de 2015 y Febrero de 2016 y los medidos por MLCC (Caserones) en su monitoreo de calidad de aguas entre Enero de 2012 y Febrero de 2016. Para la comparación, se utilizan los dos parámetros indicadores más importantes utilizados para identificar influencia de aguas de origen minero, ellos son: conductividad eléctrica (medida en terreno) y concentración de sulfatos (analizados en laboratorio). También se estudia la variación de los caudales en aguas superficiales y de los niveles freáticos en aguas subterráneas

En el siguiente análisis sólo se incluyen los puntos de monitoreo en donde GP realizó su muestreo y en donde además existan mediciones históricas realizadas por MLCC.

Aguas Superficiales

En la **Figura N°5.15** se presenta un esquema de distribución de los puntos de monitoreo de aguas superficiales de la quebrada La Brea, mientras que en la **Figura N°5.16** se grafican los caudales, la conductividad eléctrica y los sulfatos desde Ene-2012 hasta Feb-2016. Se diferencian los puntos de muestreo que se ubican aguas arriba del depósito de lamas con los que se ubican aguas abajo.

♦ **Puntos Aguas Arriba del Depósito:**

En la **quebrada La Brea** (LM-31) los caudales varían bastante (entre 1 y 67 L/s), mostrándose un aumento en las mediciones a partir de 2015. Respecto a la conductividad, los valores van entre 853 y 1380 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sin observarse ninguna variación marcada hacia su aumento o disminución. Los valores de sulfatos en tanto, se mueven entre 377 y 803 mg/L sin una tendencia marcada. Las mediciones realizadas por GP son completamente concordantes con las mediciones de Caserones para estos parámetros.

En los puntos de la **quebrada Roco** (LM-42 y LM-51) existen pocas mediciones históricas realizadas por Caserones, tan solo dos de caudal de 0,5 y 5 L/s, las cuales están en el rango de la medición efectuada en Feb-2016 por GP. Tanto la conductividad como el sulfato son coincidentes en ambos puntos de medición de la quebrada, y también concordantes con lo que midió GP. La conductividad va entre 160 y 518 $\mu\text{S}/\text{cm}$, salvo dos peaks de 1410 y 983 $\mu\text{S}/\text{cm}$, explicados por una tormenta y el deshielo 2015-16, respectivamente. Los sulfatos por su parte, van entre 24 y 129 mg/L, salvo por el peak del deshielo 2015-16 que llega hasta 442 mg/L.

El **río Ramadillas** antes de la quebrada La Brea (LM-10) tiene mediciones desde 2004. Los caudales varían entre 149 y 3238 L/s, encontrándose los valores más altos entre Diciembre y Febrero debido al deshielo. En este caso no es posible hacer una comparación con el valor medido por GP en Febrero de 2016 (557 L/s) ya que no existen mediciones en fechas similares, y en época de deshielo las variaciones son importantes entre una medición y otra. La conductividad va entre 160 y 784 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo bastante constante salvo un período de bajos valores (menores a 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) entre Sep-2013 y Ene-2014. Los sulfatos en tanto, se mueven entre 98 y 369 mg/L, sin ninguna tendencia histórica destacable. GP midió valores de conductividad y sulfatos similares a los registrados por Caserones.

♦ **Punto Aguas Abajo del Depósito:**

El **río Ramadillas** después de la quebrada La Brea (LM-27) tiene mediciones desde 2010. Los caudales varían entre 85 y 1090 L/s, encontrándose los valores más altos entre Diciembre y Febrero debido al deshielo. En este caso no es posible hacer una comparación con el valor medido por GP en Febrero de 2016 (616 L/s) debido a las mismas razones explicadas para el punto LM-10. La conductividad tiene valores que van entre 303 y 929 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sin tendencias históricas, salvo dos valores mayores a 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Nov-2015, ambos con presencia de agua turbia. Los sulfatos por su parte, varían entre 169 y 368 mg/L en este punto, sin existir una tendencia histórica importante. Los valores medidos por GP son coincidentes en estos dos parámetros de calidad.

Se destaca la similitud de todos los parámetros analizados entre los puntos de monitoreo ubicados en el río Ramadillas aguas arriba y aguas abajo de la quebrada La Brea (LM-10 y LM-27).

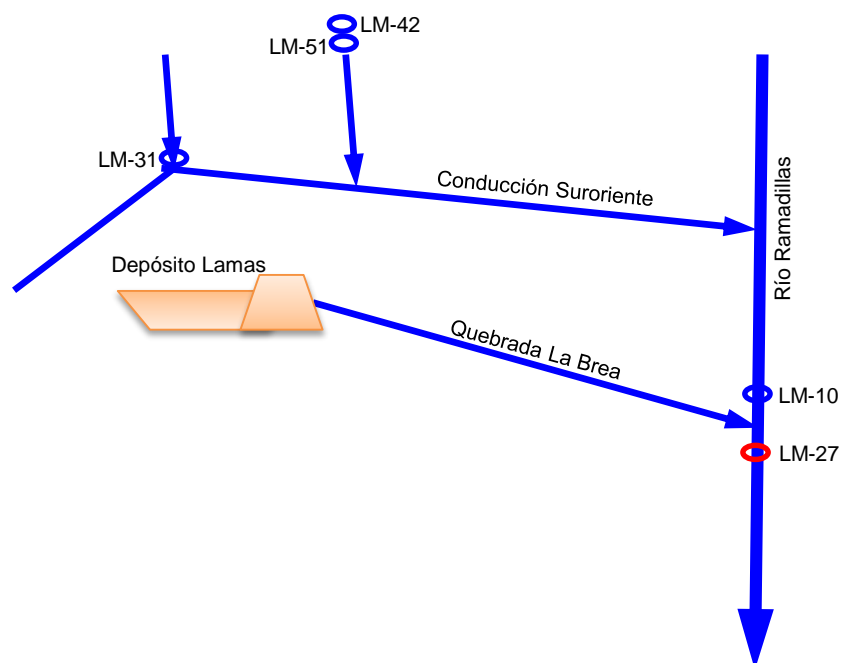


Figura N°5.15: Ubicación estaciones de aguas superficiales monitoreadas en terreno por GP.

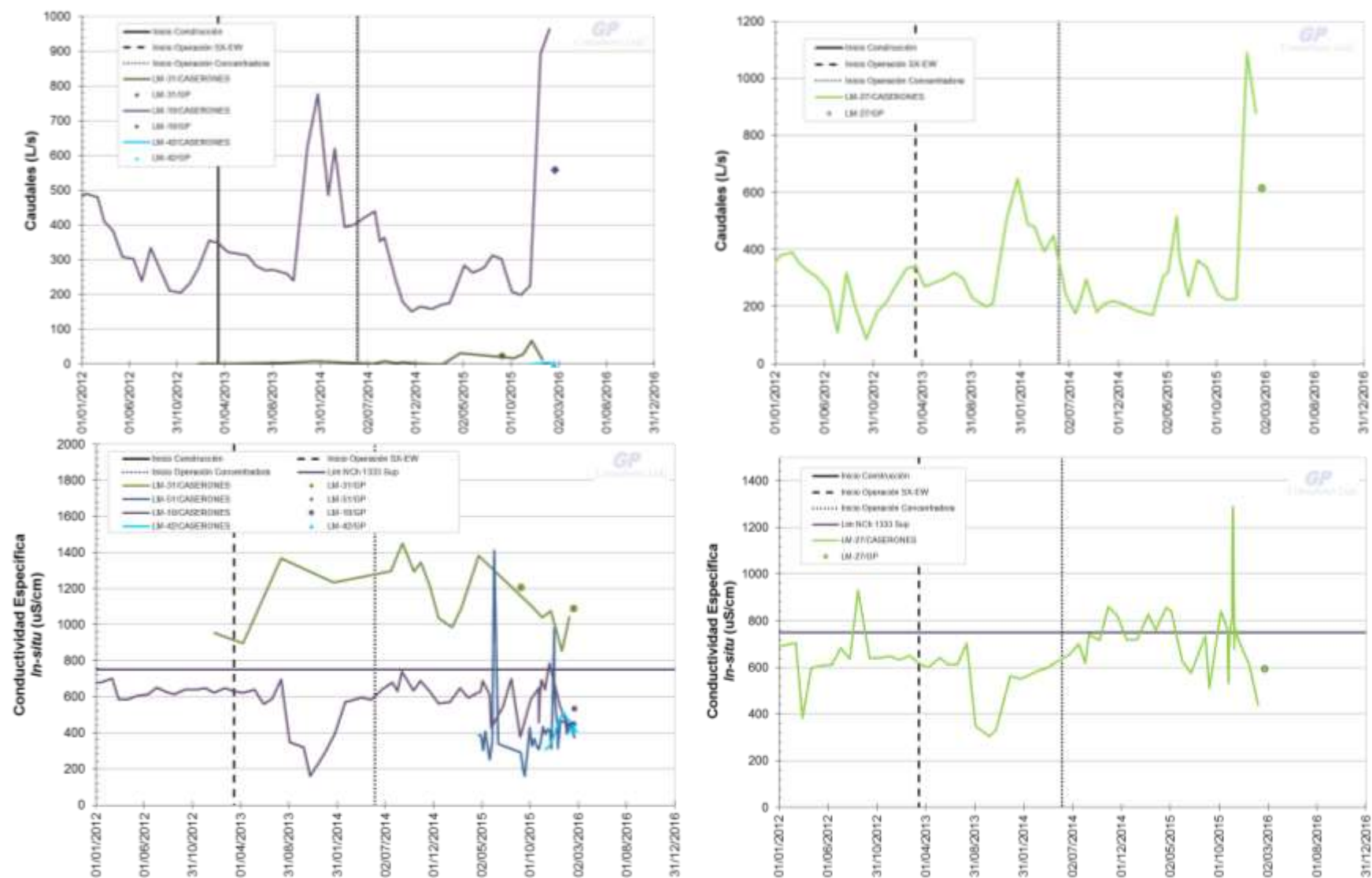


Figura N°5.16: Tendencias históricas de parámetros indicadores en aguas superficiales, aguas arriba (izq) y aguas abajo del depósito (der).

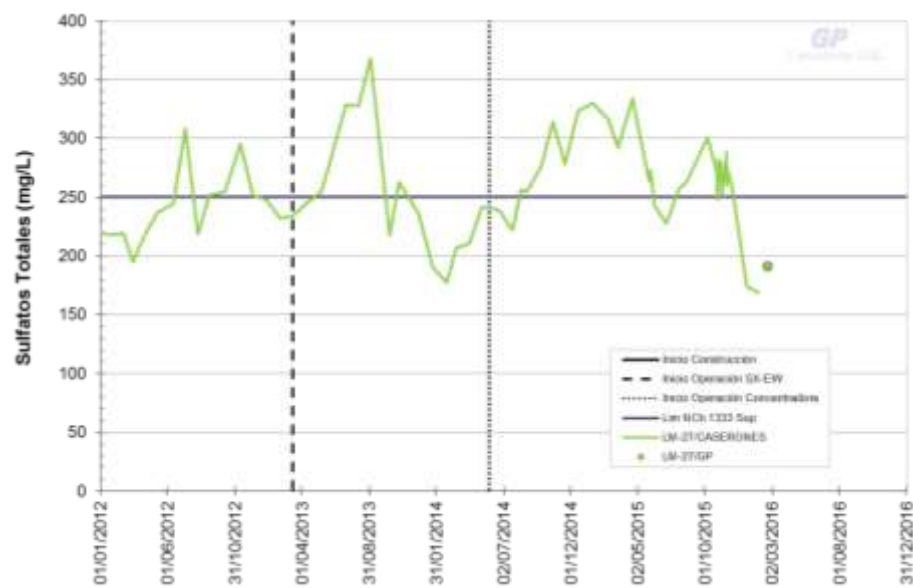


Figura N°5.16 (continuación): Tendencias históricas de parámetros indicadores en aguas superficiales, aguas arriba (izq) y aguas abajo del depósito (der).

Aguas Subterráneas

En las **Figuras N°5.17 a N°5.20** se presentan esquemas con la distribución de los puntos de monitoreo y se grafican en el tiempo, los niveles, la conductividad eléctrica y la concentración de sulfatos de las aguas subterráneas de la quebrada La Brea. Se diferencian los pozos que se ubican aguas arriba del depósito de lamas con los que se ubican aguas abajo.

♦ ***Pozos Aguas Arriba del Depósito:***

En la **quebrada La Brea**, los niveles de las aguas subterráneas medidos por Caserones en el multinivel MNB-4 están comprendidos entre 7,07 y 8,61 mbnb (metros bajo nivel del brocal o boca del pozo), y los medidos por GP están entre 7,53 y 7,73 mbnb. Las Conductividades Eléctricas de las aguas medidas en ese multinivel por Caserones, presentan variaciones entre 871 y 2014 $\mu\text{S/cm}$, las cuales son coincidentes en los 3 piezómetros. Las mediciones efectuadas por GP (entre 1086 y 1319 $\mu\text{S/cm}$) se encuentran en dicho rango histórico. Lo mismo sucede con las concentraciones históricas de sulfatos, las cuales varían entre 250 y 780 mg/L; en la campaña realizada por GP se midieron concentraciones entre 352 y 540 mg/L.

En la **quebrada Roco** el pozo PZL-1 ha mostrado variaciones importantes en sus niveles en el rango de 5,36 y 13,83 mbnb, existiendo un ascenso paulatino en el tiempo. GP midió un nivel de 5,21 en Feb-2016. En tanto, el pozo MNL-3A tiene mediciones bastante constantes, entre 13,80 y 13,95 mbnb. GP midió niveles dentro de este rango. La conductividad eléctrica en el punto PZL-1 va en general entre 150 y 530 $\mu\text{S/cm}$, mientras que en el punto MNL-3A va entre 435 y 670 $\mu\text{S/cm}$. En ambos casos no existen tendencias históricas marcadas, y GP midió valores dentro de estos rangos. Los sulfatos en tanto se encontraron para el punto PZL-1 entre 39 y 115 mg/L (salvo un valor alto de 224 mg/L), existiendo un leve ascenso de las concentraciones desde Septiembre de 2015. GP midió 127 mg/L en Feb-2016. Para el punto MNL-3A las concentraciones de sulfatos se movieron sin ninguna tendencia marcada entre 46 y 179 mg/L, encontrándose los valores de GP dentro de este rango.

En el **río Ramadillas** antes de la quebrada La Brea el pozo WP-1 tiene conductividades que oscilan entre 459 y 968 $\mu\text{S/cm}$, sin ninguna tendencia histórica y encontrándose el valor de GP dentro de este rango. Algo parecido sucede con los sulfatos, los cuales oscilan entre 150 a 278 mg/L.

♦ ***Pozos Aguas Abajo del Depósito:***

Luego de que el depósito La Brea se comenzó a llenar (May-2014), **los niveles** de los pozos aguas abajo comenzaron a subir de inmediato, hasta que los pozos de bombeo se activaron (Nov-2014), logrando revertir la tendencia, y comenzando los niveles nuevamente a bajar, sin llegar a sus niveles iniciales (a excepción del pozo BRW-2). La reacción en los pozos fue rápida, destacándose el hecho que, a medida que los pozos se alejan del muro, la magnitud del ascenso inicial de niveles fue menor.

Se observa un aumento de las concentraciones de sulfatos una vez que el depósito de lamas empezó a operar. Esta variación ocurre desde casi el comienzo, pero más lento que los niveles.

A medida que los pozos se alejan del depósito el efecto tardó más en llegar a su máximo y fue de menor magnitud.

Los **pozos de bombeo de la cortina hidráulica** presentaron un aumento importante en sus concentraciones posterior al inicio de la operación del depósito de lamas, con concentraciones de sulfatos aumentando desde un rango 250-450 mg/L hasta 1400 mg/L. En tanto, los valores de sulfatos medidos por GP en esos pozos en Sep-2015 varían entre 893 y 1246 mg/L y en Feb-2016 varían entre 777 y 1472 mg/L. En esos últimos 6 meses las concentraciones han sido relativamente constantes. Similar condición se observa con las mediciones de conductividad en estos pozos.

Los **pozos de monitoreo** (MNB-5 y MNB-6) presentan concentraciones relativamente constantes de sulfatos que van en general entre 800 y 1400 mg/L, siendo el pozo MNB-5A la excepción, con concentraciones en torno a los 600 mg/L. En las mediciones de 2016 los sulfatos bajaron abruptamente en los pozos MNB-6 llegando a valores en torno a 200 mg/L en Feb-2016. Las mediciones de GP están siempre dentro de estos rangos. Con la conductividad sucede algo similar.

El **pozo de monitoreo WE-2**, ubicado en el sector del río Ramadillas, presenta un comportamiento distinto al observado en los pozos del sector de la quebrada La Brea. Sus niveles han ido bajando paulatinamente desde 6,76 mbnb en Feb-2008 hasta 21,16 mbnb en Nov-2015. El nivel medido por GP fue de 18,20 mbnb en Feb-2016. La variación de los sulfatos y las mediciones realizadas por GP demuestran calidades distintas dentro del pozo (ver **Figura N°5.20**), debido probablemente a aporte desde distintos acuíferos. A mayores profundidades los sulfatos están en torno a los 500 mg/L mientras que a menores profundidades los sulfatos están en torno a los 200 mg/L. Sucede algo similar con las mediciones de conductividad.

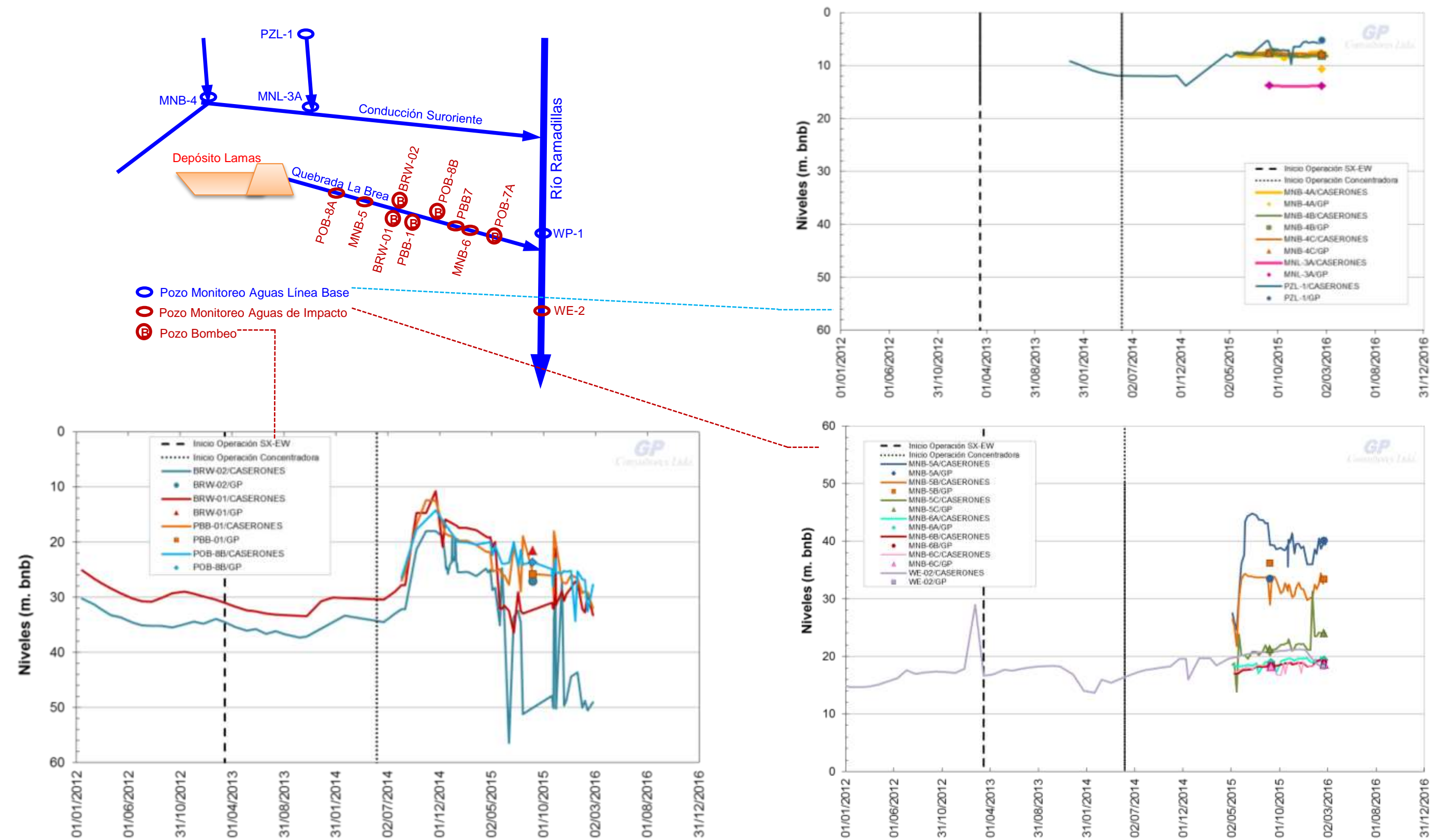


Figura N°5.17: Niveles (m. bnb) históricos de las aguas subterráneas en la quebrada La Brea.

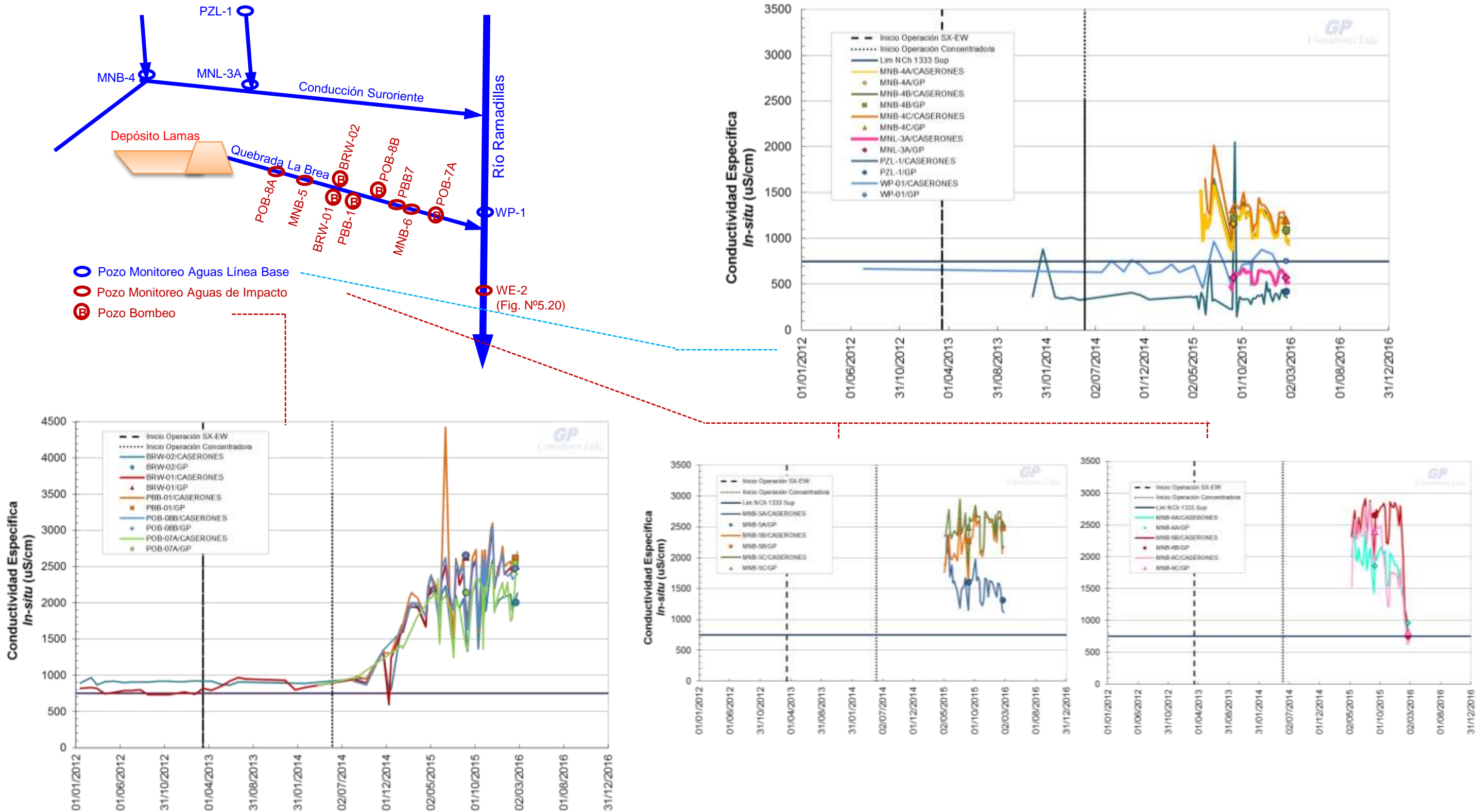


Figura N°5.18: Conductividad específica (µS/cm) histórica en las aguas subterráneas de quebrada La Brea.

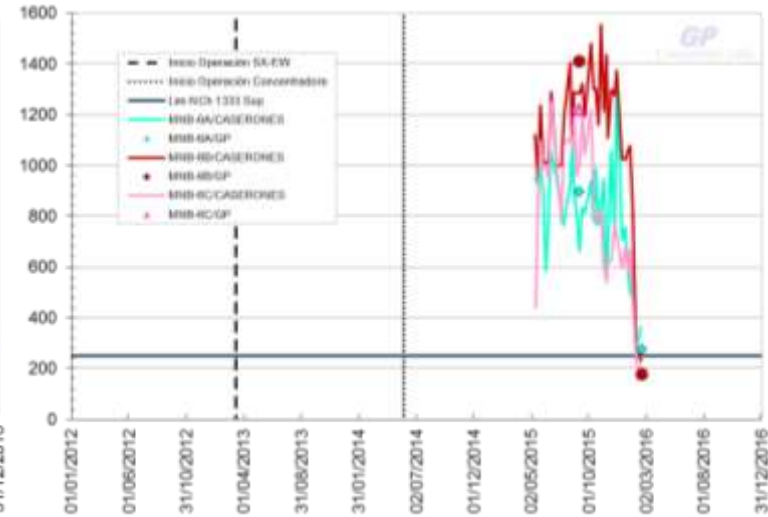
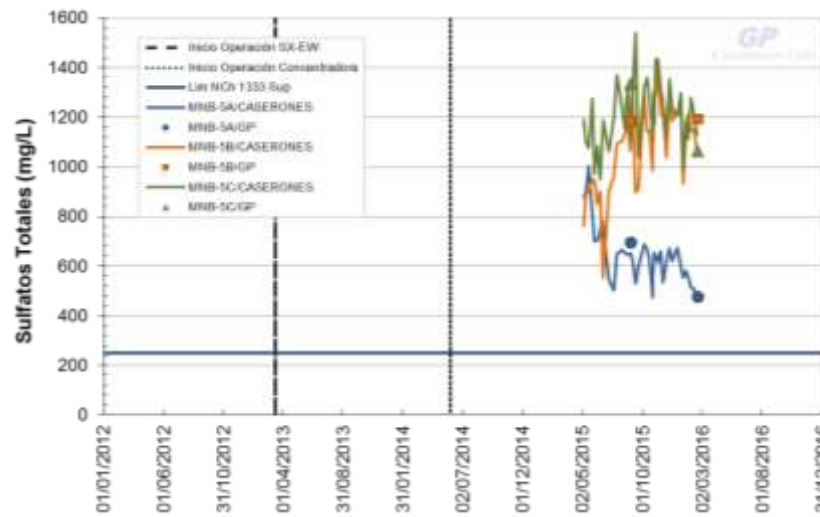
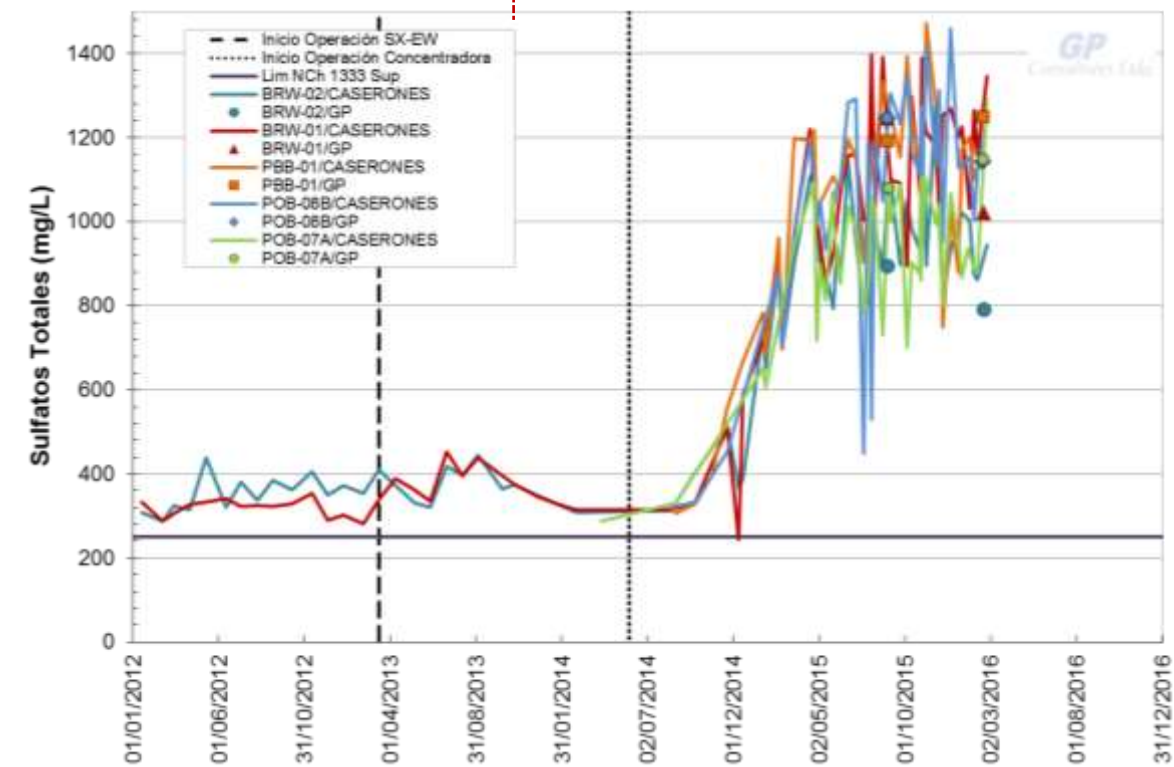
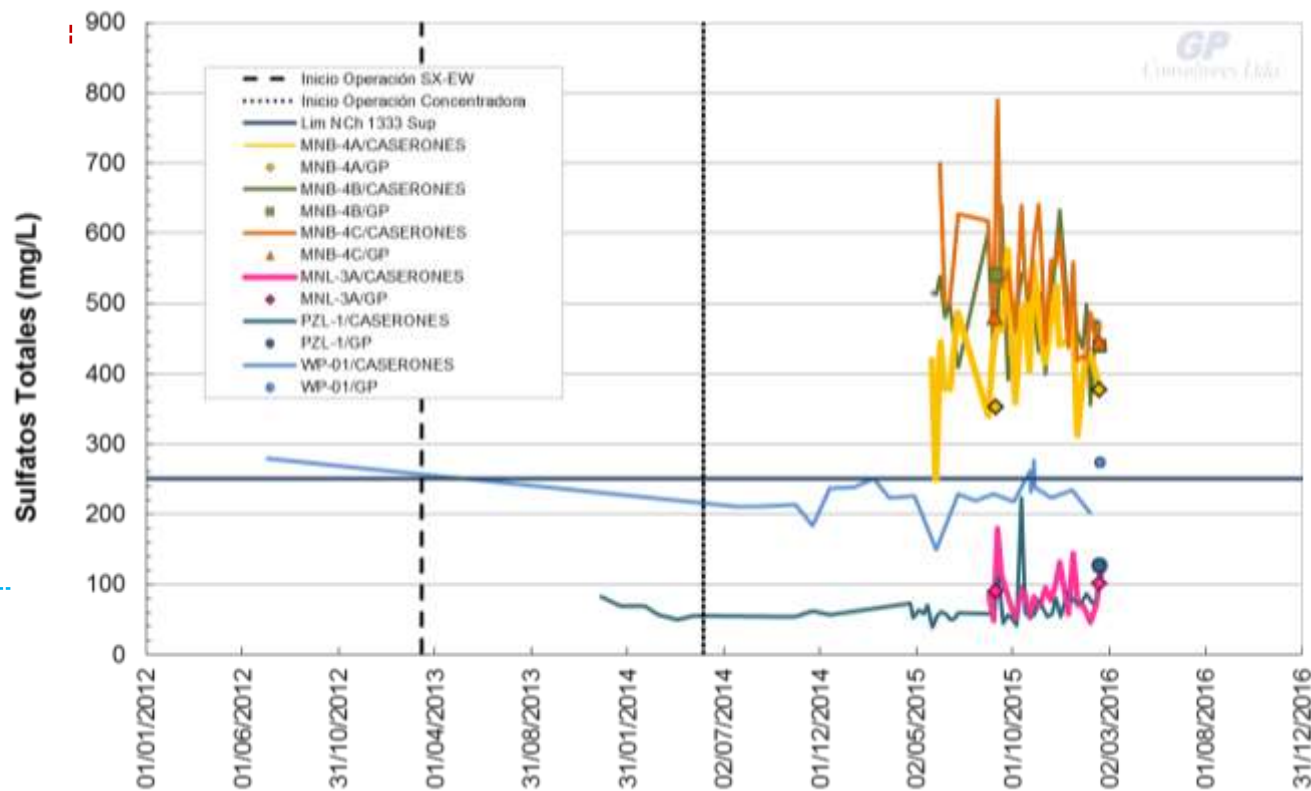
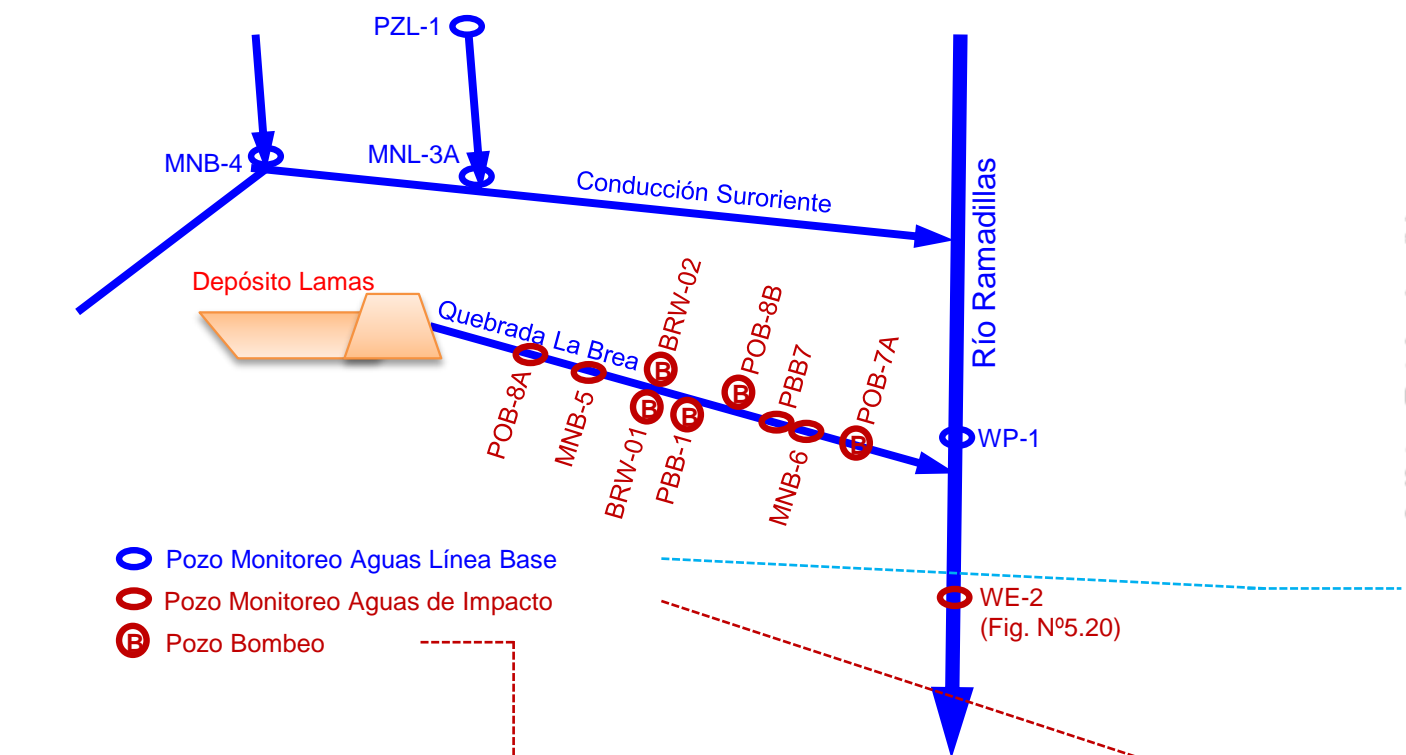


Figura N°5.19: Concentración histórica de sulfatos (mg/L) en las aguas subterráneas de quebrada La Brea.

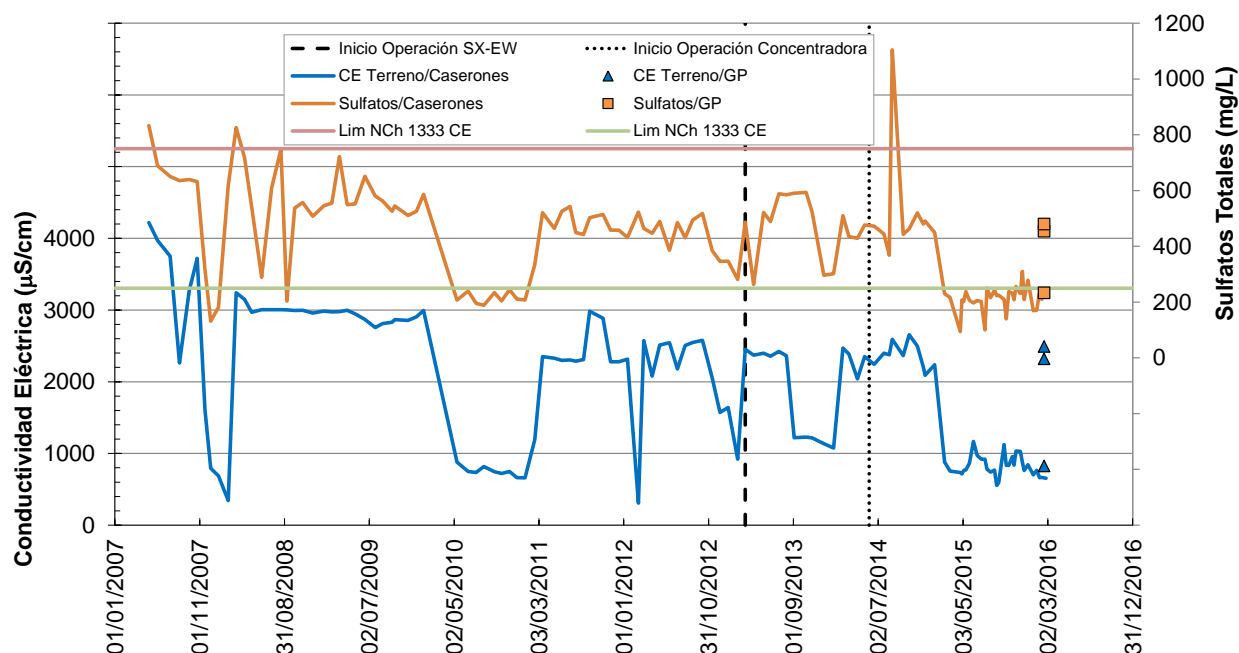


Figura N°5.20: Concentración histórica de sulfatos en el pozo WE-2.

5.3 CALIDAD DE LAS AGUAS EN SEPTIEMBRE 2015 Y EN FEBRERO 2016

En el acápite siguiente, se incluyen todas las mediciones GP considerando las fechas de monitoreo asociados a períodos húmedos-post lluvias (Sept-2015) y secos-previos a lluvias (Feb-2016).

5.3.1 Distribución de Valores de los Parámetros Indicadores de Influencia de Aguas de Origen Minero

Se consideran a continuación los mismos parámetros seleccionados en el punto 5.3.3 como indicadores de influencia de aguas de origen minero, estos son conductividad eléctrica y sulfatos.

Conductividad Eléctrica (*in situ*) / Sólidos Disueltos Totales (Figura N°5.21):

En ambas campañas de muestreo existe una clara diferencia entre las aguas de los puntos monitoreados aguas arriba del depósito de lamas y las de los otros sectores muestreados. Aguas arriba del depósito las aguas (superficiales y subterráneas) presentan valores de CE menores a 1400 µS/cm. Las aguas subterráneas de la quebrada Roco presentan menores valores de CE que las aguas subterráneas de la quebrada La Brea (un rango entre 421 y 574 µS/cm versus un rango entre 1086 y 1319 µS/cm, respectivamente).

Las aguas del depósito de lamas tienen conductividades por sobre los 3000 µS/cm (SDT>2000mg/L), mientras que los pozos ubicados aguas abajo del depósito, presentan valores de CE bajo los 3000 µS/cm, salvo el pozo PRLB-3 (40 y 60 m) en la primera campaña. Mientras en la Zona de Recuperación todos los pozos tienen conductividades sobre los 2500 µS/cm, salvo el pozo PRLB-8 (a 70 m en la Campaña I y a 87 m en la Campaña II), en la Zona de Remediación existen varios pozos con valores de CE menores a los 2500 µS/cm, sobre todo por el flanco

izquierdo de la quebrada y hacia aguas más profundas. Aguas abajo del depósito existe un sutil descenso en la conductividad entre la primera y la segunda campaña, el cual se hace importante en el multinivel MNB-6, en donde en la segunda campaña todos los valores de CE dieron bajo los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en comparación con los valores cercanos a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de la primera campaña.

Las aguas del río Ramadillas fueron medidas solamente en Febrero de 2016. Aguas arriba de La Brea se midieron valores de CE de 531 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las aguas superficiales y de 751 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las aguas subterráneas, mientras que aguas abajo los valores de CE fueron de 593 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las aguas superficiales y de entre 826 y 2390 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las aguas subterráneas. En tanto, las vertientes que vienen desde la Brea midieron valores de 601 y 1231 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Concentración de Sulfatos (laboratorio) (Figura N°5.23):

Existe una clara diferenciación entre las aguas de los puntos monitoreados aguas arriba del depósito de lamas, las aguas del depósito de lamas y las aguas de los pozos aguas abajo del depósito de lamas. Los pozos aguas arriba por lo general no superan los 500 mg/L en sulfatos, mientras que las aguas del depósito de lamas y de los pozos aguas abajo del depósito, por lo general superan los 1000 mg/L.

Aguas arriba del depósito, los sulfatos hacen diferenciar bastante a las aguas subterráneas de la quebrada La Brea respecto de las aguas subterráneas de la quebrada Roco. Mientras las primeras tienen concentraciones mayores a los 300 mg/L, las segundas tienen concentraciones menores a los 150 mg/L.

No se observa una clara diferenciación entre las aguas del depósito de lamas y las aguas de los pozos ubicados aguas abajo del depósito de lamas. No obstante, existe una leve diferencia entre los pozos ubicados en la Zona de Recuperación y los que se encuentran en la Zona de Remediación. En esta última zona existen pozos con concentraciones de sulfatos menores a 1000 mg/L, sobre todo por el flanco izquierdo de la quebrada y hacia aguas más profundas. Existe un sutil descenso en la concentración de sulfatos entre la primera y la segunda campaña, el cual se hace importante en el multinivel MNB-6, en donde en la segunda campaña todos los valores de sulfatos dieron bajo los 400 mg/L.

Las aguas del río Ramadillas fueron muestreadas solamente en Febrero de 2016. Aguas arriba de La Brea se midieron concentraciones de sulfatos de 189 mg/L en las aguas superficiales y de 272 mg/L en las aguas subterráneas, mientras que aguas abajo las concentraciones de sulfatos fueron de 191 mg/L en las aguas superficiales y de entre 233 y 480 mg/L en las aguas subterráneas. En tanto, las vertientes que vienen desde la Brea midieron valores de 239 y 427 mg/L.



Figura N°5.21: Distribución espacial de los valores de CE (*in-situ*) en los muestreos realizados por GP.

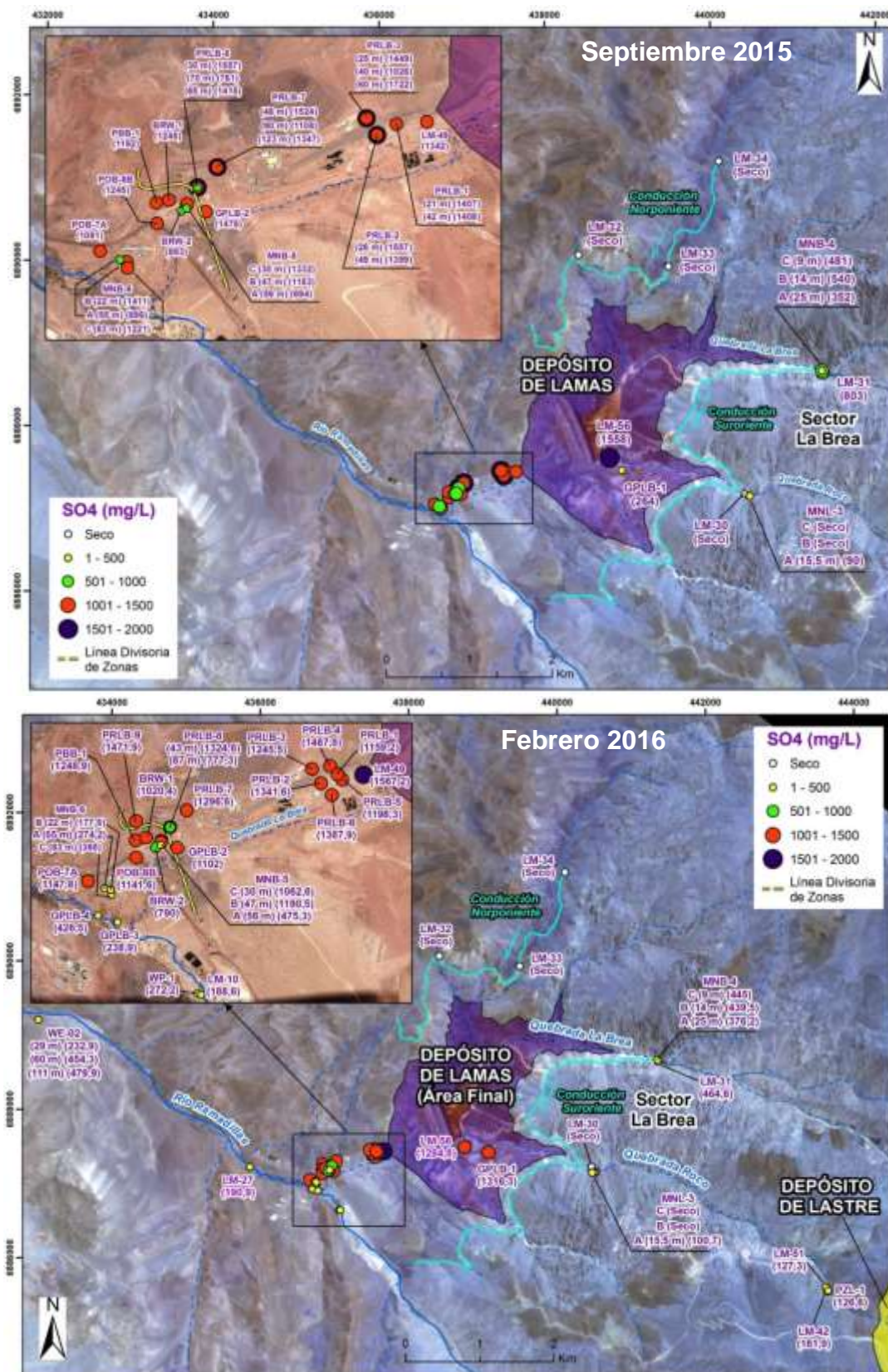


Figura N°5.23: Distribución de los valores de sulfatos en los muestreos realizados por GP.

5.3.2 Macroelementos

A continuación se presentan las mediciones de Septiembre 2015 y Febrero 2016 en diagramas de Piper y de Stiff.

Diagrama de Piper:

Dependiendo de su origen, las aguas monitoreadas aguas arriba del depósito de lamas (fuera del área de influencia del depósito) se diferencian en su marca química. Las aguas subterráneas de la **quebrada La Brea** tienen una composición sulfatada-cálcica con un contenido de sulfatos que varía entre un 69% y un 95% (LM-31) de los aniones y de calcio cercano al 60% de los cationes. Las muestras de agua subterránea de la **quebrada Roco** son todas sulfatadas-cálcicas, salvo la muestra del pozo MNL-3A la cual es de tipo bicarbonatada-cálcica, con 65% de los aniones de bicarbonato. Resulta extraño el elevado porcentaje de sulfatos en la muestra LM-42 (>80% de los aniones) en comparación con el resto de las muestras (<60%).

Las **aguas del depósito de lamas** tienen una marca química sulfatada (de los aniones un 87% para LM-56 y entre 86 y 87% para LM-49) - cálcica (de los cationes un 65 a 69% para LM-56 y un 59 a 61% para LM-49). La muestra de las aguas recuperadas en los drenes (LM-49) tiene un mayor contenido porcentual de magnesio en sus cationes que la muestra de las aguas claras (LM-56). La laguna Cantera-2 (GPLB-1) pasó de ser una mezcla entre aguas del depósito y aguas de la quebrada Roco en la primera campaña, a ser un agua prácticamente igual a la del depósito de lamas en la segunda.

Las **aguas de los pozos ubicados aguas abajo del depósito de lamas** son casi todas sulfatadas-cálcicas. De hecho, casi todas las muestras tienen un contenido porcentual de sulfatos en los aniones mayor al 75% y un contenido entre 40 y 50% de calcio en los cationes. La excepción la dan las muestras del multinivel MNB-6 en la segunda campaña, las cuales son de tipo cálcicas (>50% de los cationes) sin tener un anión dominante.

En las **Figuras N°5.24 y N°5.25** se presentan los diagramas de Piper de las aguas de los muestreos realizados por GP (Sep-2015 y Feb-2016). En estos diagramas se evidencia un agrupamiento de las aguas de los pozos de aguas abajo del depósito alrededor de las aguas representativas del depósito de lamas, salvo las aguas de los pozos PRLB-3 (40m y 60m) y PRLB-8 (70m) en la Campaña I y del multinivel MNB-6 y pozo PRLB-8 (60 y 111m) en la segunda campaña. Estos datos en comparación con los datos de línea base (**Figura N°5.14**) muestran claramente la influencia de las aguas del depósito de lamas en las aguas subterráneas localizadas aguas abajo del depósito. Estos datos también muestran claramente la diferencia química entre aguas arriba y aguas abajo del depósito de lamas. Por último, entre la primera y segunda campaña se observa una leve disminución del porcentaje sulfatado en las aguas del depósito de lamas y en los pozos aguas abajo de éste.

Analizando el caso del pozo **PRLB-8** a 70m (Campaña I) y a 87m (Campaña II), estas muestras tienen conductividad y sulfatos mucho menores que las muestras más someras y más profundas, siendo excepcionalmente de tipo sódica (56%). Al parecer este punto tendría algún problema

puntual de representación, con aguas externas no removidas durante el desarrollo del pozo y el posterior bombeo, o bien algún ingreso de diferente calidad a través de una fractura en la roca.

Durante la Campaña II se hizo un muestreo hidroquímico de las aguas del **río Ramadillas** aguas arriba y aguas abajo de la quebrada La Brea. Las aguas superficiales aguas arriba y aguas abajo de La Brea son del tipo sulfatado-cálcico, siendo muy parecidas entre ellas. Por otra parte, las aguas subterráneas aguas arriba de La Brea son también del tipo sulfatado-cálcico, y las muestras tomadas del pozo WE-2 aguas abajo de La Brea son sulfatadas la más somera y cloruradas-sódicas las más profundas, lo cual hace presumir dos acuíferos de distinta calidad, encontrándose sólo el más somero conectado al río Ramadillas. Respecto a las vertientes en la confluencia entre el río Ramadillas y la quebrada La Brea, ambas son del tipo sulfatado-cálcico (sulfatos son 73 a 80% de los aniones y calcio son 59 a 61% de los cationes), acercándose bastante a los pozos aguas abajo del depósito de lamas.

Diagramas de Stiff:

Al igual que en el diagrama de Piper, en los diagramas de Stiff se evidencia una diferencia entre las quebradas de aguas arriba del depósito de lamas y los pozos de la quebrada La Brea aguas abajo (**Figuras N°5.26 y N°5.27**). Si bien el agua subterránea de la **quebrada La Brea** aguas arriba del depósito tiene una composición sulfatada-cálcica, al igual que las aguas de los pozos de aguas abajo del depósito, sus concentraciones son mucho menores. Las únicas aguas que no tienen esa composición son las relacionadas a la **quebrada Roco** (PZL-1, LM-42, LM-51 y MNL-3A), las cuales tienen bajas concentraciones de macroelementos.

Casi todas las aguas de los **pozos ubicados por la quebrada La Brea aguas abajo del depósito de lamas**, se asimilaran, en composición y concentración de macroelementos, a las aguas del depósito de lamas. Las excepciones en la primera campaña son los pozos PRLB-3 a 40m y PRLB-8 a 30m, los cuales tienen un mayor contenido de magnesio que de calcio, aunque esta anomalía es poco importante. También está el caso del pozo PRLB-8 a 70m, el cual tiene mayor cantidad de sodio que de calcio. Durante la segunda campaña, las excepciones son nuevamente el pozo PRLB-8 a 87, el cual también tiene más sodio de calcio, y el multinivel MNB-6 el cual tiene bajas concentraciones de macroelementos. Las posibles causas de la anomalía en el pozo PRLB-8 ya se dieron en párrafos anteriores (problemas en el desarrollo o ingreso de agua por fracturas), el caso del multinivel MNB-6 es que probablemente estén ingresando aguas del río Ramadillas, lo que será explicado más adelante en el análisis isotópico.

En el muestreo del **río Ramadillas** de la segunda campaña se observa lo mismo que se vio en el Piper. Todas las aguas son sulfatadas-cálcicas con bajas concentraciones de macroelementos comparadas con el agua que viene desde La Brea, salvo el pozo WE-2 a las profundidades 60 y 111 m, cuyas aguas son cloruradas-sódicas, provenientes tal vez de un acuífero más profundo. Respecto a las vertientes muestreadas, la vertiente GPLB-4 tiene mayores concentraciones de sulfatos y calcio que la GPLB-3.

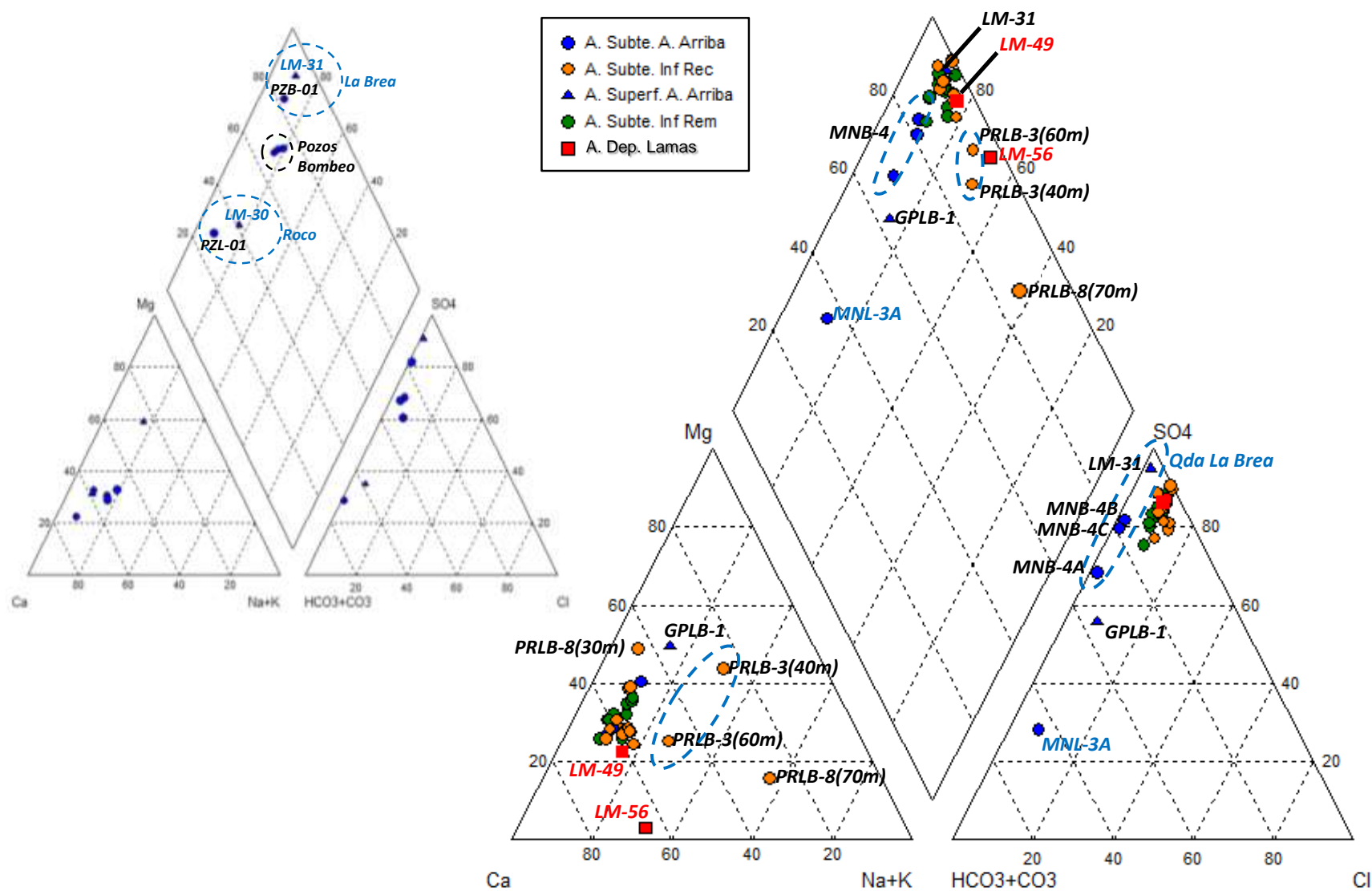


Figura N°5.24: Diagrama de Piper comparativo entre las aguas de línea base (a la izquierda) y las muestreadas por GP en Septiembre 2015 (a la derecha).

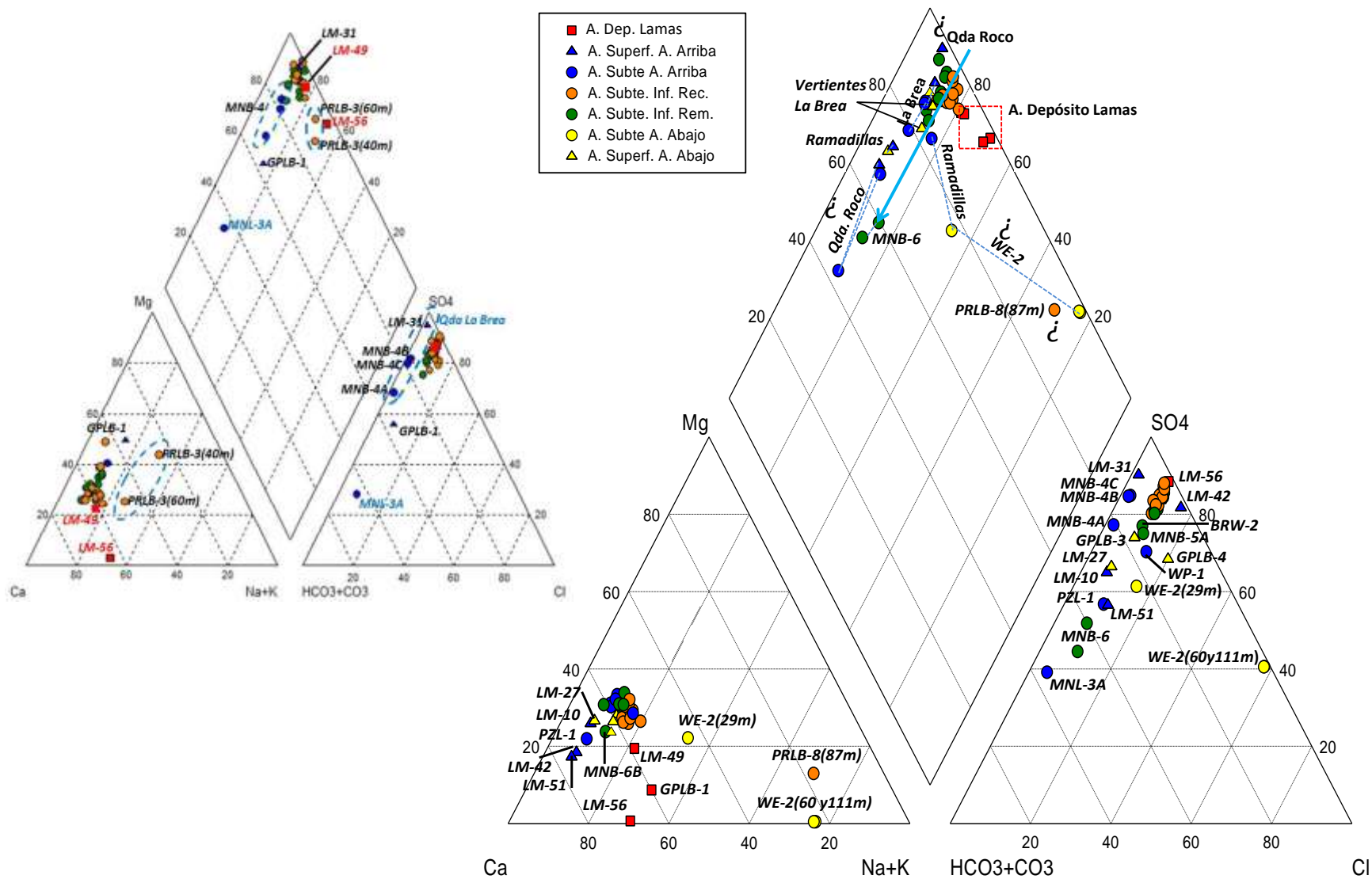


Figura N°5.25: Diagrama de Piper comparativo entre las aguas muestreadas por GP en la primera campaña (izquierda) y en la segunda campaña (derecha).

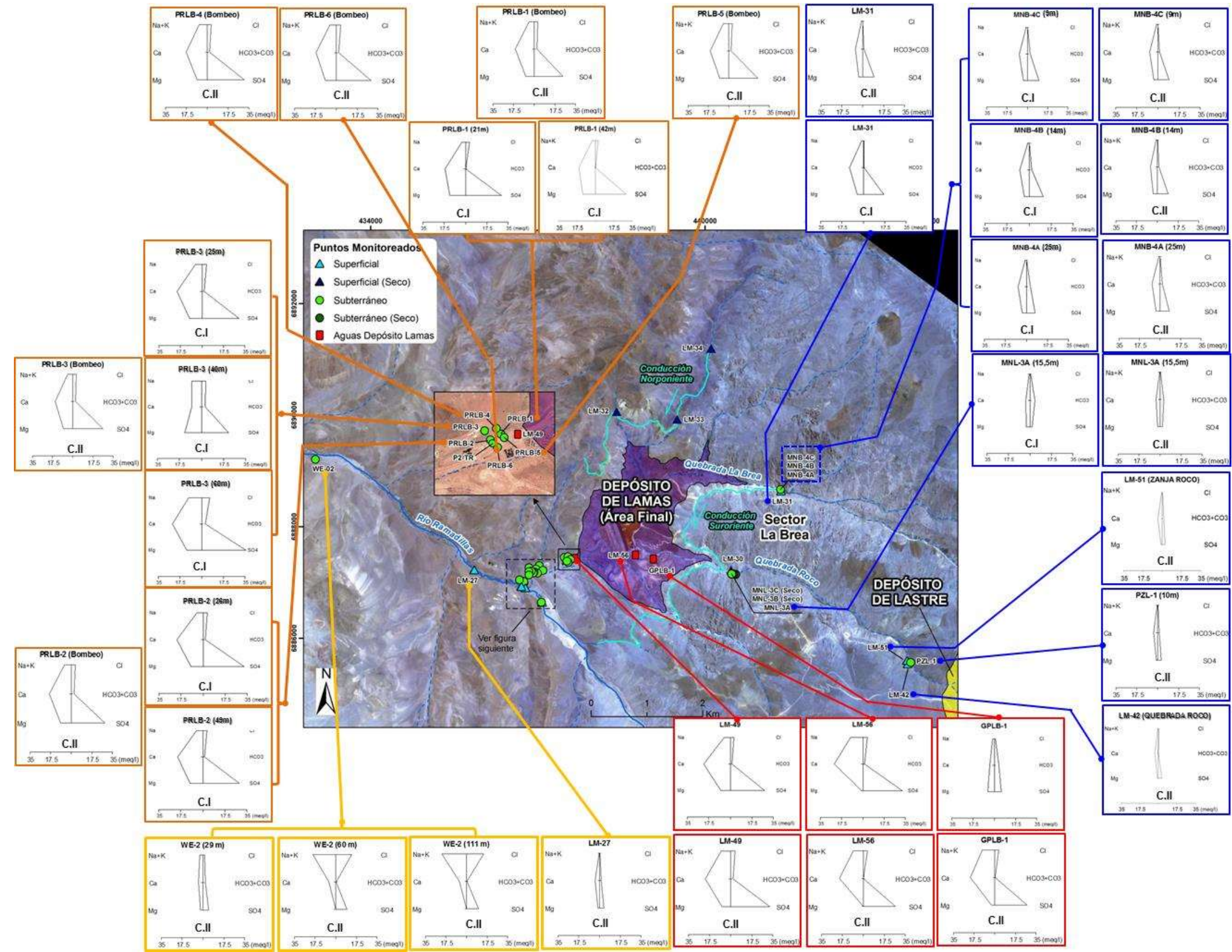


Figura N°5.26: Diagramas Stiff parte alta del sector en estudio.

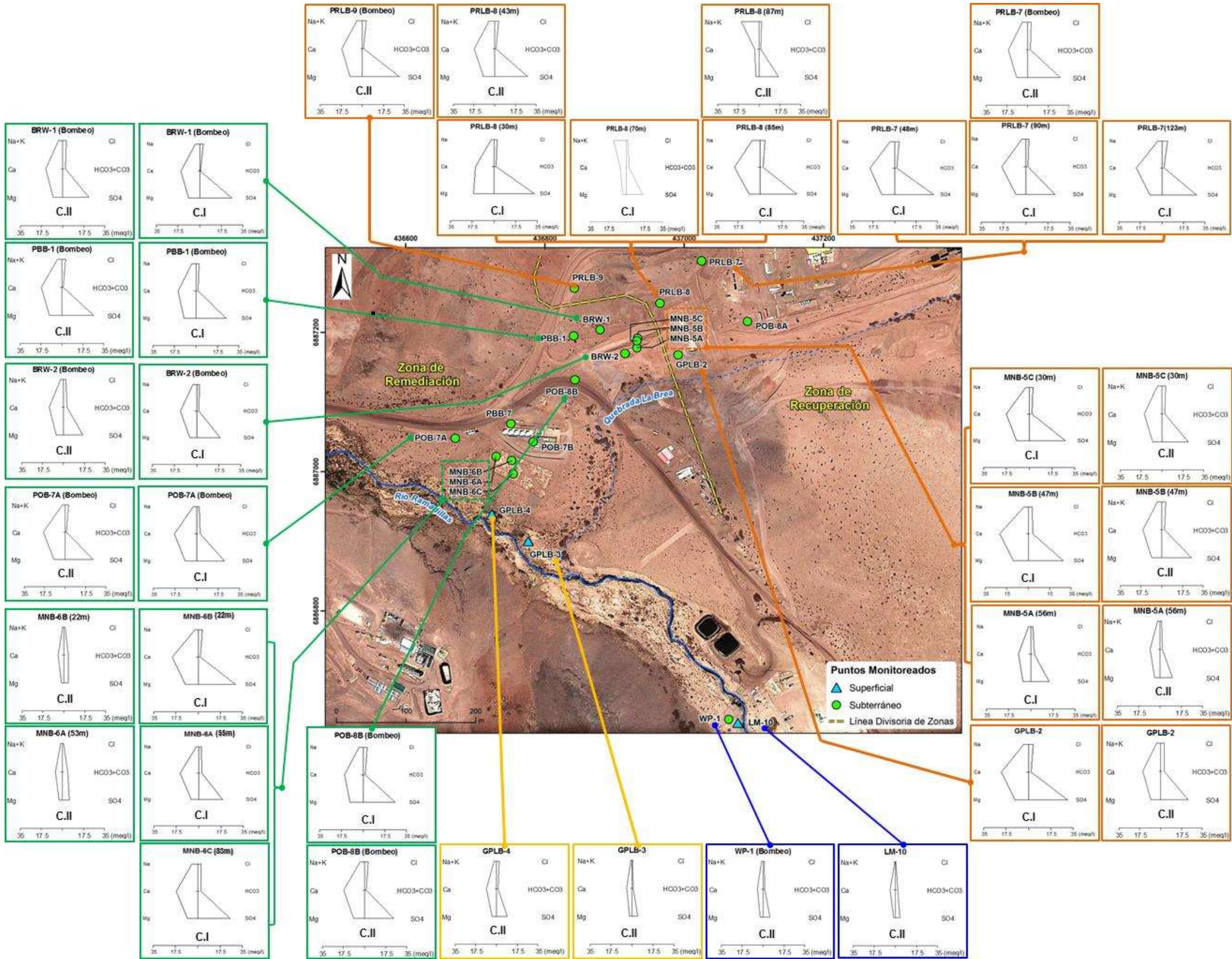


Figura N°5.27: Diagramas Stiff parte baja del sector en estudio.

5.3.3 Elementos Traza

A continuación se analizan por campaña las concentraciones de todos los elementos traza, comparándolos con la normativa de riego (a modo de referencia) y buscando particularidades en su distribución espacial. Se incluye en este análisis la concentración de sólidos suspendidos totales por ser un parámetro que se relaciona con la concentración de varios de estos metales.

Aluminio:

En la Campaña I todos los puntos monitoreados se encuentran bajo la normativa de riego (5 mg/L). En general las concentraciones se sitúan bajo los 0,2 mg/L, salvo dos puntos en la quebrada La Brea, aguas arriba del depósito de lamas (LM-31 y MNB-4C), en donde las concentraciones superan los 2 mg/L, y el pozo PRLB-3 a 25 m, que tiene una concentración de 0,83 mg/L.

En la Campaña II todos los puntos monitoreados se encuentran bajo la normativa de riego. En general las concentraciones se sitúan bajo los 0,2 mg/L, salvo en los puntos ubicados en las quebradas La Brea y Roco aguas arriba del Depósito de Lamas, MNB-4C, PZL-1 y MNL-3A (1,09 mg/L, 0,39 mg/L y 0,4 mg/L respectivamente); en el pozo PRLB-2 de la Zona de Recuperación, con una concentración de 0,59 mg/L; y en los puntos del río Ramadillas LM-10 y LM-27, que levemente superan los 0,2 mg/L (0,24 mg/L y 0,21 mg/L respectivamente).

Arsénico:

En la Campaña I no se supera la normativa de riego (0,1 mg/L) en ningún punto de monitoreo. Existe un punto que está por sobre los 0,05 mg/L, el pozo PRLB-3 a 60 m. No existe una importante diferencia entre los distintos tipos de agua (aguas arriba, aguas del depósito de lamas y pozos aguas abajo del depósito).

En la Campaña II no se supera la normativa de riego en ningún punto de monitoreo. Los dos puntos con más altas concentraciones se encuentran en la Zona de Recuperación (pozos PRLB-2 y PRLB-6 con 0,049 y 0,048 mg/L respectivamente). Existe una clara diferencia entre las aguas de la zona aguas arriba y aguas abajo del depósito de lamas, siendo las primeras las que muestran las concentraciones más bajas (entre los 0,006 a 0,016 mg/L). Por su parte, aguas abajo del depósito, las concentraciones varían entre los 0,006 a 0,049 mg/L.

Bario:

En la Campaña I todos los puntos se encuentran bajo los 0,1 mg/L, por lo tanto la normativa de riego (4 mg/L) no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo. No existe ninguna diferencia entre los distintos tipos de agua (aguas arriba, aguas del depósito de lamas y pozos aguas abajo del depósito).

En la Campaña II la mayor parte de las concentraciones se encuentran bajo los 0,1 mg/L, por lo tanto la normativa de riego no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo. Sólo los puntos PZL-1, MNL-3A y GPLB-1 exceden ligeramente los 0,1 mg/L, estando todos estos relacionados con la quebrada Roco.

Berilio:

En ambas campañas, todos los puntos se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro (0,01 mg/L) y por ende bajo la normativa de riego (0,1 mg/L).

Boro:

En la Campaña I la normativa de riego (4 mg/L) no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo. No existe una importante diferencia entre los distintos tipos de agua (aguas arriba, aguas del depósito de lamas y pozos aguas abajo del depósito). En general las concentraciones se sitúan bajo los 0,3 mg/L, salvo tres puntos en los pozos PRLB-3 (a 40 m y 60 m) y PRLB-8 (a 85 m).

En la Campaña II la normativa de riego no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo. En general las concentraciones se sitúan bajo los 0,3 mg/L, salvo los puntos: PRLB-3 y PRLB-4 que sobrepasan levemente dicho valor, y los puntos GPLB-2 y MNB-6A que están muy cercanos a éste. En general los pozos en la zona de recuperación y las aguas claras, son los que muestran las concentraciones más altas (0,1 a 0,3 mg/L), mientras que los puntos ubicados en la zona aguas arriba del depósito tiene solamente valores menores a 0,1 mg/L.

Cadmio:

En la Campaña I todos los puntos se sitúan bajo el límite de detección de este parámetro (0,0015 mg/L), salvo los puntos LM-56, PRLB-3 a 60 m y MNB-5C (30 m). De estos sólo el pozo PRLB-3 a 60 m supera la normativa de riego (0,01 mg/L).

En la Campaña II todos los puntos se sitúan bajo el límite de detección de este parámetro y por ende bajo la normativa de riego.

Cianuro:

En ambas campañas, todos los puntos se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro (0,05 mg/L) y por ende bajo la normativa de riego (0,2 mg/L).

Cobalto:

En ambas campañas, todos los puntos se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro (0,01 mg/L) y por ende bajo la normativa de riego (0,05 mg/L).

Cobre:

En la Campaña I la normativa de riego (0,2 mg/L) no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo. No existe una importante diferencia entre los distintos tipos de agua (aguas arriba, aguas del depósito de lamas y pozos aguas debajo del depósito).

En la Campaña II, la normativa de riego no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo. La mayoría de las concentraciones se sitúan por debajo de 0,05 mg/L, salvo las muestras tomadas en el río Ramadillas (LM-10 y LM-27) que se acercan a los 0,1 mg/L.

Cromo Total:

En la Campaña I todos los puntos se encuentran bajo o en el límite de detección de este parámetro (0,01 mg/L), salvo el punto MNB-5A (56 m) que tiene una concentración de 0,02 mg/L, que está bajo la normativa de riego (0,1 mg/L).

En la Campaña II todos los puntos se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro y por ende bajo la normativa de riego.

Fluoruro:

En la Campaña I todos los puntos se encuentran bajo la normativa de riego (1 mg/L). Todos los puntos se sitúan bajo los 0,5 mg/L salvo dos: LM-31 y LM-56. Destacan también los bajos valores de fluoruros del punto MNL-3A.

En la Campaña II todos los puntos se encuentran bajo la normativa de riego. Las concentraciones se sitúan bajo los 0,5 mg/L, salvo los puntos: LM-31, LM-56 y WE-2 (a 60 m y a 111 m). Destacan los bajos valores de fluoruros en todos los puntos de la quebrada Roco (PZL-1, LM-42, LM-51 y MNL-3A).

Fierro:

En la Campaña I el único punto que supera la normativa de riego (5 mg/L) es el pozo MNB-4C (9 m), con una concentración levemente superior, de 5,84 mg/L.

En la Campaña II las concentraciones para la mayoría de los pozos se sitúan bajo los 0,1 mg/L. Hay dos puntos que superan la normativa de riego, estos son los pozos MNB-4C (9,46 mg/L) y WE-2 a 60 m (10,40 mg/L). Destacan también otros valores de fierro altos (mayores a 1 mg/L), en los puntos MNB-4B, POB-8A, GPLB-4, WE-2 a 29 m y a 111 m.

Litio:

En la Campaña I todos los puntos se encuentran bajo los 0,2 mg/L, no sobrepasándose la normativa de riego (2,5 mg/L) en ningún punto de monitoreo. No existe una importante diferencia entre los distintos tipos de agua (aguas arriba, aguas del depósito de lamas y pozos aguas abajo del depósito de).

En la Campaña II todos los puntos se encuentran bajo los 0,2 mg/L, salvo el pozo PRLB-4 en el cual se midieron 0,24 mg/L. Por ende, la normativa de riego no es sobrepasada en ninguno de los puntos de monitoreo. Tanto los puntos ubicados aguas arriba del depósito como las aguas de proceso tienen concentraciones menores a los 0,05 mg/L, mientras que aguas abajo del depósito, en la Zona de Recuperación, las concentraciones son todas mayores a los 0,05 mg/L (menos el punto POB-8A con 0,01 mg/L). Hacia aguas abajo, las concentraciones disminuyen a valores bajo los 0,1 mg/L.

Manganeso:

En la Campaña I la normativa de riego (0,2 mg/L) es superada en varios puntos: LM-31, MNB-4C (9 m), LM-49, PRLB-3 (25 m, 40 m y 60 m). Destaca el valor de las aguas claras (LM-49) de 5 mg/L.

En la Campaña II la normativa de riego es superada en algunos puntos aislados: MNB-4C, GPLB-5, LM-49 y GPLB-4. Destaca con importancia el valor de los drenes (LM-49) con 1,62 mg/L. Los puntos aguas arriba del depósito de lamas indican valores entre 0,02 a 0,14 mg/L, mientras que los pozos ubicados en la quebrada La Brea aguas abajo del depósito están todos bajo el límite de detección (0,1 mg/L), salvo los pozos POB-08A y POB-7A.

Mercurio:

En ambas campañas, todos los puntos se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro (0,001 mg/L), que es igual a la normativa de riego.

Molibdeno:

En la Campaña I la normativa de riego (0,01 mg/L igual al límite de detección) es superada en varios puntos: LM-31, LM-56, LM-49, MNB-6C (83 m). Todos los puntos están bajo los 0,05 mg/L salvo las aguas del depósito de lamas que tienen valores de 0,86 mg/L (LM-56) y 0,67 mg/L (LM-49).

En la Campaña II la normativa de riego es superada en los siguientes puntos aislados: GPLB-1, LM-56, PRLB-5, PRLB-6, P2-TR, BRW- 2, MNB-6A y WE-2 (a 60 m). Todo el resto de las concentraciones están por debajo del límite de detección. Destacan los puntos correspondientes al depósito de lamas GPLB-1 y LM-56, con valores de 0,7 mg/L y 0,66 mg/L respectivamente.

Níquel:

En la Campaña I la normativa de riego (0,2 mg/L) no es superada en ningún punto. De hecho, la mayoría de los puntos se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro (0,01 mg/L), salvo los puntos LM-31, MNB-4C (9 m), PRLB-3 (40 y 60 m), PRLB-7 (90 m), MNB-5A (56 m) y MNB-5B (47 m), que tienen una concentración de 0,02 mg/L.

En la Campaña II la normativa de riego no es superada en ningún punto. De hecho, todos los puntos se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro.

Plata:

En la Campaña I la normativa de riego (0,2 mg/L) no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo. No existen importantes diferencias entre los distintos tipos de agua (línea base, aguas del depósito de lamas y pozos aguas abajo).

En la Campaña II la normativa de riego no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo. Todos los puntos tienen concentraciones bajo los 0,05 mg/L, a excepción de los puntos de aguas arriba del depósito LM-51, MNB-4A y MNB-4C, con valores de 0,05 mg/L. En los puntos relacionados al río Ramadillas se registran las concentraciones más bajas entre 0,01 y 0,02 mg/L.

Plomo:

En la Campaña I la normativa de riego (5 mg/L) no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo, la mayoría de los cuales se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro (0,003 mg/L). No existe ninguna diferencia entre los distintos tipos de agua (aguas arriba, aguas del depósito de lamas y pozos aguas abajo del depósito).

En la Campaña II la normativa de riego (5 mg/L) no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo, la mayoría de los cuales se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro, salvo los puntos PZL-1 (0,014 mg/L), PRLB-6 (0,005 mg/L) y BRW-1 (0,017 mg/L).

Selenio:

En ambas campañas, todos los puntos se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro (0,004 mg/L) y por ende bajo la normativa de riego (0,02 mg/L).

Sólidos Suspendedos Totales:

En la Campaña I la mayoría de los puntos se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro (10 mg/L), el cual no se encuentra normado. Los puntos que están sobre los 10 mg/L son: MNB-4C (9 m) y MNB-6C (83 m).

En la Campaña II la mayoría de los puntos se encuentran bajo el límite de detección de este parámetro, el cual no se encuentra normado. Los puntos que están sobre los 10 mg/L son: PZL-

1, MNB-4A, GPLB-1, LM-56, PRLB-8 (43 m), P2-TR, POB-8A, PBB-1, POB-7A y WE-2 (a 60 m y 111 m). Destacan los altos valores de los puntos POB-8A con 58 mg/L y WE-2 (111 m) con 39 mg/L.

Vanadio:

En todos los puntos de monitoreo de la Campaña I se cumple con la normativa de riego para este parámetro (0,1 mg/L), salvo en los pozos de bombeo BRW-2, PBB-1 y POB-8B. Existe una diferenciación entre los puntos de línea base y aguas del depósito de lamas con los puntos que se encuentra aguas abajo del depósito de lamas. Los primeros dos tipos de agua no superan los 0,02 mg/L, mientras que la mayoría de los pozos aguas abajo del tranque tienen concentraciones sobre los 0,02 mg/L. Los pozos de bombeo por lo general muestran mayores concentraciones (en torno a 0,1 mg/L) que el resto de los pozos.

En la Campaña II la normativa de riego para este parámetro se cumple para casi todos los puntos, salvo en PRLB-4 y WE-2 (a 60 m y 111 m). Los puntos medidos aguas arriba del depósito de relaves tienen concentraciones bajo los 0,04 mg/L, siendo en general menores a las concentraciones de aguas abajo del depósito. Las aguas del depósito de relaves (LM-56 y GPLB-1) tienen valores menores o iguales al límite de detección (0,01 mg/L).

Zinc:

En la Campaña I la normativa de riego (2 mg/L) no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo. No existe una importante diferencia entre los distintos tipos de agua (aguas arriba, aguas del depósito de lamas y pozos aguas debajo del depósito). Todos los puntos se encuentran bajo los 0,3 mg/L, salvo el pozo PRLB-7 (90m) con un valor de 1,5 mg/L.

En la Campaña II la normativa de riego no es sobrepasada en ningún punto de monitoreo. Destacan las concentraciones en los puntos PZL-1 (0,48 mg/L), MNB-4A (0,12 mg/L), MNB-4B (0,07 mg/L), MNB-4C (0,13 mg/L), LM-56 (0,1 mg/L), PRLB-1 (0,08 mg/L), PRLB-2 (0,48 mg/L), LM-10 (0,14 mg/L) y LM-27 (0,09 mg/L). Salvo por los puntos en el río Ramadillas (LM-10 y LM-27), no existe un patrón espacial en el resto de los puntos altos.

5.4 VARIACIÓN HIDROQUÍMICA EN LA COLUMNA DE AGUA DE LOS POZOS

A continuación se efectúa un análisis de los resultados obtenidos en los perfilajes físico-químicos realizados en los pozos muestreados en Septiembre 2015 y Febrero 2016. También se agregan a este análisis los multipiezómetros MNB-4, MNB-5 y MNB-6, los cuales a pesar de no tener perfilajes, se pueden analizar a través de las muestras que se obtuvieron a diferentes profundidades. Los sulfatos medidos discretamente a las profundidades de muestreo también se incluyen en el siguiente análisis.

5.4.1 Pozos Aguas Arriba del Depósito de Lamas

MNB-4 (Figura N°4.9): En este multipiezómetro se obtuvieron muestras a 9 mbnb, 14 mbnb y a 25 mbnb. En la Campaña I, la temperatura con una variación entre 12,5 y 8,4°C, la conductividad con una variación entre 1319 y 1156 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y los sulfatos con una variación entre 660 y 510 mg/L, sufrieron una leve disminución con la profundidad, mientras que el pH se mantuvo en torno a 7 en las muestras. En la Campaña II en tanto, la temperatura y la conductividad disminuyeron con la profundidad (T° entre 15,4 y 12,0°C y CE entre 1198 y 1083

μS/cm), mientras que el pH y los sulfatos aumentaron (pH entre 6,5 y 7,2 y SO₄ entre 485 y 545 mg/L).

5.4.2 Pozos Zona de Recuperación, Aguas Abajo del Depósito de Lamas

PRLB-1 (Figura N°4.3): Solamente perfilado durante la Campaña I. La temperatura tiene un perfil prácticamente constante hasta los 41 mbnb, donde aumenta desde 13,7°C hasta 14,6°C hasta el final del pozo. Algo similar sucede con la conductividad, la cual aumenta desde 2700 μS/cm hasta casi 3500 μS/cm desde los 51 mbnb. El pH en tanto, aumenta prácticamente una unidad desde esa misma profundidad (de 7,1 a 8,0). La explicación más probable para esto es que existan ingresos de agua desde los 40 mbnb hacia abajo ya que la calidad cambia en esta parte del pozo. Hacia arriba existen flujos verticales que homogenizan la calidad. Las muestras se tomaron en el tramo homogéneo de conductividad, por lo que los sulfatos varían levemente disminuyendo en profundidad desde 1650 mg/L a 21mbnb, hasta 1520 mg/L a 42mbnb.

PRLB-2 (Figura N°4.4): Solamente perfilado durante la Campaña I. La temperatura tiene un perfil constante hasta los 46 mbnb, profundidad desde la cual aumenta desde 13,7 a 14,3°C en el fondo del pozo. El pH y la conductividad son constantes hasta los 58 mbnb (7,1 y 2720 μS/cm respectivamente). Desde esa profundidad y hasta el fondo del pozo ambos parámetros aumentan notoriamente (con un máximo de 7,6 y 3690 μS/cm respectivamente). Considerando estos perfiles, probablemente existen ingresos de agua desde los 46 mbnb hacia abajo. Los últimos metros del pozo se encontraría afectados por los sedimentos del fondo. Las muestras se tomaron en el tramo homogéneo de conductividad, por lo que los sulfatos casi no presentaron variación en profundidad (1480 a 26 mbnb y 1490 mg/L a 49 mbnb).

PRLB-3 (Figura N°4.5): Solamente perfilado durante la Campaña I. Los perfilajes muestran dos tramos, con pendientes diferentes. La separación se encuentra entre los 32 y los 38 mbnb. Esto implica una separación dada probablemente por un acuitardo o condiciones hidrogeológicas diferentes entre ambos tramos. La temperatura en el primer tramo es constante (13,9°C), mientras que en el segundo tramo aumenta (entre 14,2 y 14,6°C). Asimismo, la conductividad en el primer tramo es constante (2670 μS/cm), mientras en el segundo tramo aumenta (entre 2980 y 3380 μS/cm). El pH en tanto, en el primer tramo disminuye entre 7,5 y 7,3, y en el segundo tramo sigue disminuyendo a una menor tasa entre 7,1 y 7,0. Se tomó una muestra en la parte más somera del acuífero y luego dos muestras en la parte más profunda. Los sulfatos se encontraron en torno a los 1500 mg/L en los dos extremos y en la muestra de la mitad fueron más bajos (1026 mg/L).

PRLB-7 (Figura N°4.8): Solamente perfilado durante la Campaña I. El perfil de temperatura se mantiene constante hasta los 60 mbnb, lugar desde el cual aumenta ostensiblemente (entre 14,3 y 16,0°C) hasta el fondo del pozo. En los perfiles de conductividad y pH se observa un cambio a los 60 mbnb, siendo casi constantes antes y después de ese cambio (conductividad aprox. 2620 y 2800 μS/cm y pH aprox. 7,2 y 7,4 en cada tramo). Observando el perfil estratigráfico, estos cambios se deben a que en torno a los 60 mbnb se encuentra el contacto roca-relleno. Se tomaron 3 muestras, una representando el tramo más somero del acuífero, otra la parte media y otra la parte más profunda (123 mbnb) que no quedó representada por el perfilaje. Los sulfatos en estas 3 muestras son prácticamente iguales (entre 1310 y 1360 mg/L).

PRLB-8 (Figura N°4.9): En la Campaña I este pozo se pudo perfilar solamente hasta los 97 mbnb, ya que el sensor de presión no permitía seguir descendiendo. Por el mismo motivo, en la Campaña II se perfiló hasta los 92 mbnb. En ambas campañas, el perfil de temperatura se mantiene constante hasta los 60 mbnb, lugar desde el cual aumenta ostensiblemente (de 14,5°C hasta 16,5°C) hasta los 92 mbnb. La conductividad en la Campaña I va disminuyendo desde los 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta los 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a los 80 mbnb, donde aumenta bruscamente hasta los 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, conductividad que se mantiene hacia abajo. En la Campaña II la conductividad sigue una constante cercana a 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta los 58 mbnb, donde empieza a disminuir hasta llegar a 2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 90 mbnb, para luego aumentar abruptamente a 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 92 mbnb. El pH medido en la Campaña I es constante hasta los 60 mbnb, aumentando luego de 7 a 8,6 hasta los 80 mbnb. Luego disminuye hasta casi los 7 en el término de las mediciones. En la Campaña II se tomaron dos muestras para medir pH, observándose un aumento desde 7,23 a 43 mbnb hasta 8,24 a 87 mbnb. Respecto a las muestras de la Campaña I, estas fueron tomadas en los 3 distintos tramos del perfil, siendo las concentraciones de sulfatos coincidentes con la conductividad, es decir, existe una menor concentración a los 70 mbnb (800 mg/L) en donde fue tomada una muestra. Las otras muestras se tomaron en la zona uniforme del perfil (1390 mg/L a 30 mbnb), y más abajo (1230 mg/L a 85 mbnb). En la Campaña II en tanto, las muestras se tomaron en los dos tramos relativamente homogéneos en conductividad, a 43 mbnb con una concentración de sulfatos de 1390 mg/L, y a 87 mbnb con 960 mg/L.

Los perfiles de pH y conductividad indican una anomalía que crece hasta los 80 mbnb (90 mbnb en la Campaña II), esto puede deberse a un evento puntual de alteración producto de la perforación, que no pudo removerse durante el desarrollo del pozo ni en el posterior bombeo, o a algún ingreso de un agua de diferente calidad a través de una fractura en la roca. Respecto a la estratigrafía, el cambio roca-relleno se produce bajo los 50 mbnb, lo que explicaría las variaciones de pH y temperatura.

5.4.3 Pozos Zona de Remediación, Aguas Abajo del Depósito de Lamas

MNB-5 (Figura N°4.10): En este multipiezómetro se extrajeron muestras a 30 mbnb, 47 mbnb y a 56 mbnb. En la Campaña I la temperatura evidenció un aumento con la profundidad (de 15,3 a 18,9°C), mientras que la conductividad y los sulfatos bajaron notoriamente con la profundidad (2490 a 1601 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1280 a 645 mg/L, respectivamente). El pH no sostuvo una tendencia con la profundidad, teniendo valores similares, que van entre 7,2 y 7,5. En la Campaña II en tanto, la temperatura (se cree que está afectada por el muestreo) disminuye con la profundidad (de 25,6 a 20,0°C), la conductividad y los sulfatos al igual que en la Campaña I, bajan con la profundidad (2550 a 1310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1240 a 550 mg/L, respectivamente), mientras que el pH sigue en los mismos valores que en la Campaña I (7,2 a 7,5).

MNB-6 (Figura N°4.13): En este multipiezómetro se obtuvieron muestras a 22 mbnb, 55 mbnb (53 mbnb en la Campaña II) y a 83 mbnb. En la Campaña I la temperatura tiene su valor más alto a la profundidad media (17,4°C), mientras que la conductividad y los sulfatos son menores a esta profundidad (1849 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 995 mg/L respectivamente). El pH no sufre variaciones, encontrándose en 7,4 para las 3 profundidades. En la Campaña II en tanto, la temperatura (se cree que está afectada por el muestreo) disminuye con la profundidad (de 27,9 a 18,6°C), la

conductividad tiene su valor más alto a la profundidad media (956 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mientras los sulfatos y el pH aumentan levemente con la profundidad (de 215 a 365 mg/L y de 7,5 a 7,6, respectivamente).

5.4.4 Pozos Río Ramadillas, Aguas Abajo del Depósito de Lamas

WE-2 (Figura N°4.14): Solamente perfilado durante la Campaña II y hasta una profundidad de 90 mbnb debido a la capacidad del sensor de presión del equipo. El perfilaje muestra dos tramos. La separación se encuentra entre los 35 y los 40 mbnb. Esto implica una separación dada probablemente por un acuitardo o condiciones hidrogeológicas diferentes entre ambos tramos. La temperatura en el primer tramo disminuye entre 17,5 y 17,8°C, mientras que en el segundo tramo disminuye entre 19,1 y 20,4°C. Asimismo, la conductividad en los dos tramos es relativamente constante (en torno a los 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el primero y en torno a 2600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el segundo). El pH solamente fue muestreado discretamente, al igual que los sulfatos (a 29, 60 y 111 mbnb). En el primer tramo tienen un valor de 7,7 y 230 mg/L, respectivamente, aumentando hacia el segundo tramo con valores entre 8,5-8,6 y entre 1340-1350 mg/L, respectivamente.

5.5 ANÁLISIS ISOTÓPICO

En esta sección se analizan los datos isotópicos correspondientes a las campañas de Septiembre 2015 y Febrero 2016.

5.5.1 Oxígeno-18 y Deuterio del Agua

Los resultados de los análisis de isótopos del agua se presentan en **Figura N°5.28** y **Figura N°5.29**. La distribución espacial de esos valores en la quebrada La Brea aguas abajo del depósito de lamas se exhibe en **Figura N°5.30** y **Figura N°5.31**.

Respecto a los resultados obtenidos, se observa un amplio rango de valores. En la quebrada La Brea para la primera campaña los valores varían entre -11,5 y -9,3‰ y entre -91 y -78‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente. Para la segunda campaña la variación es mayor aún, con valores entre -12,2 y -7,7‰ y entre -92 y -71‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente.

Las aguas del depósito de lamas quedan identificadas con la siguiente marca isotópica (ver **Figuras N°5.28** y **N°5.29**):

◆ Aguas Claras (LM-56):	Campaña I: $\delta^{18}\text{O} = -9,7\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -79\text{‰}$ $\text{SO}_4 = 1558 \text{ mg/L}$	Campaña II: $\delta^{18}\text{O} = -8,3\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -72\text{‰}$ $\text{SO}_4 = 1285 \text{ mg/L}$
◆ Drenes (LM-49):	Campaña I: $\delta^{18}\text{O} = -9,6\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -78\text{‰}$ $\text{SO}_4 = 1342 \text{ mg/L}$	Campaña II: $\delta^{18}\text{O} = -8,1\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -72\text{‰}$ $\text{SO}_4 = 1567 \text{ mg/L}$
◆ Aguas transporte lamas (GPLB-5):		Campaña II: $\delta^{18}\text{O} = -10,0\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -80\text{‰}$ $\text{SO}_4 = 1725 \text{ mg/L}$

Se observa un fraccionamiento importante en las aguas del depósito de lamas, dado por la evaporación en los puntos de la Campaña II. Las aguas que transportan las lamas (GPLB-5) no representan directamente las aguas que influyen a la quebrada La Brea por lo que sólo se tiene el dato de manera referencial. Esta agua tendría el mismo origen pero estaría menos evaporada que las aguas del depósito.

Respecto a las aguas subterráneas que se encuentran aguas arriba del depósito de lamas (aguas naturales), ellas poseen una de las marcas isotópicas más empobrecidas del sector (valores más negativos), las cuales son similares en ambas campañas, ubicándose cercanas a la línea meteórica mundial. En ellas se observan los siguientes rangos:

- Aguas de Quebrada Roco: $\delta^{18}\text{O}$ entre -11,5 y -11,2 ‰
 $\delta^2\text{H}$ entre -86 y -85 ‰
 SO_4 entre 90 y 162 mg/L
- Aguas de Quebrada La Brea: $\delta^{18}\text{O}$ entre -11,4 y -10,5 ‰
 $\delta^2\text{H}$ entre -83 y -79 ‰
 SO_4 entre 352 y 803 mg/L

En este sector, la excepción se presenta en el multinivel MNB-6, en la segunda campaña, con aguas aún más empobrecidas isotópicamente, las cuales eso si no se encuentran tan cercanas a la línea meteórica mundial. Una marca isotópica similar que la anterior es la que presenta el río Ramadillas, las cuales varían entre -13,4 y -10,2‰ y entre -93 y -83‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente.

Por otro lado, en ambas campañas, las aguas más enriquecidas isotópicamente son las aguas de la laguna Cantera 2 (GPLB-1), con valores $\delta^{18}\text{O} = -9,3\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -78\text{‰}$ para la primera campaña y $\delta^{18}\text{O} = -7,7\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -71\text{‰}$ para la segunda (más evaporada). Todo el resto de las aguas (menos MNB-6 en la segunda campaña) de la quebrada La Brea (aguas abajo del depósito de lamas) se alinean en una recta de pendiente 3,6, en que los extremos están representados por las aguas naturales y por las aguas de la laguna Cantera 2. Esta relación lineal representa una línea de mezcla entre aguas naturales y aguas del depósito de lamas, representadas por el agua de los drenes (LM-49) y las aguas claras (LM-56). Las aguas de la laguna Cantera 2 están más evaporadas aún debido a su baja renovación.

En **Figura N°5.28** se observa que para la Campaña I además quedan comprendidos en el rango de las aguas del depósito de lamas, las aguas de los siguientes puntos monitoreados:

- PRLB-2 (26m), pozo barrera hidráulica (BH): $\delta^{18}\text{O} = -9,6\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -78,5\text{‰}$
 $\text{SO}_4 = 1557 \text{ mg/L}$
- PRLB-2 (49m), pozo barrera hidráulica (BH): $\delta^{18}\text{O} = -9,6\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -78,2\text{‰}$
 $\text{SO}_4 = 1399 \text{ mg/L}$
- POB-8A (34m), pozo monitoreo: $\delta^{18}\text{O} = -9,6\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -78,1\text{‰}$
 $\text{SO}_4 = 1349 \text{ mg/L}$
- GPLB-2, zanja corta fuga quebrada La Brea: $\delta^{18}\text{O} = -9,6\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -77,9\text{‰}$
 $\text{SO}_4 = 1478 \text{ mg/L}$

Es decir, las aguas subterráneas recolectadas en los pozos identificados anteriormente, incluida la zanja corta fuga, presentan la misma marca isotópica que las aguas del depósito de lamas. Esto no sucede en la Campaña II (ver **Figura N°5.29**), en donde las aguas más evaporadas del depósito no han influenciado de manera importante los pozos aguas abajo (salvo el pozo PRLB-6 con $\delta^{18}\text{O} = -8,3\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -75\text{‰}$).

En la Campaña I los pozos ubicados aguas arriba de la zanja corta fuga (Zona de Recuperación) también muestran una marca isotópica similar a las aguas del depósito de lamas. Ellos son (ver **Figuras N°5.30 y N°5.31**): PRLB-3 (en sus 3 muestras de 25m, 40m y 60m), PRLB-1 (en sus 2 muestras, de 21m y 42m) y PRLB-7 en su muestra más superficial (48m). En la Campaña II también se observa una mayor influencia de las aguas del depósito en los pozos de la Zona de Recuperación.

Existe otro grupo de aguas que tienden a distanciarse de la composición isotópica de las aguas del depósito de lamas asociado a una mayor influencia de las aguas naturales. Dentro de este grupo hay pozos de la Zona de Remediación como los pozos MNB-6 (líneas A, B y C), MNB-5 (línea A), PBB-7 (a 47m), y BRW-2; pero también hay pozos como el PRLB-8 (muestras más profundas), que está en la parte terminal de la Zona de Recuperación (ver **Figuras N°5.30 y N°5.31**). En la Campaña II se destaca una posible influencia de las aguas del río Ramadillas en todas las líneas del multinivel MNB-6 y en la línea A del multinivel MNB-5.

En los perfiles verticales se aprecian algunas diferencias en los siguientes pozos muestreados a diferentes profundidades en esta zona:

● PRLB-8: Campaña I:		Campaña II:
30 m: $\delta^{18}\text{O} = -10,0\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.557 \text{ mg/L}$		43 m: $\delta^{18}\text{O} = -9,5\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.325 \text{ mg/L}$
70 m: $\delta^{18}\text{O} = -10,9\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 761 \text{ mg/L}$		
85 m: $\delta^{18}\text{O} = -10,2\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.415 \text{ mg/L}$		87 m: $\delta^{18}\text{O} = -10,5\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 777 \text{ mg/L}$
● MNB-5: Campaña I:		Campaña II:
30 m: $\delta^{18}\text{O} = -10,0\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.332 \text{ mg/L}$		30 m: $\delta^{18}\text{O} = -9,2\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.063 \text{ mg/L}$
47 m: $\delta^{18}\text{O} = -10,3\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.183 \text{ mg/L}$		47 m: $\delta^{18}\text{O} = -9,5\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.191 \text{ mg/L}$
56 m: $\delta^{18}\text{O} = -11,0\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 694 \text{ mg/L}$		56 m: $\delta^{18}\text{O} = -11,1\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 475 \text{ mg/L}$
● PBB-7: Campaña I:		
28 m: $\delta^{18}\text{O} = -9,9\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.396 \text{ mg/L}$		
47 m: $\delta^{18}\text{O} = -10,5\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.144 \text{ mg/L}$		
● MNB-6: Campaña I:		Campaña II:
22 m: $\delta^{18}\text{O} = -10,1\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.411 \text{ mg/L}$		22 m: $\delta^{18}\text{O} = -12,2\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 178 \text{ mg/L}$
55 m: $\delta^{18}\text{O} = -10,7\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 896 \text{ mg/L}$		53 m: $\delta^{18}\text{O} = -11,4\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 274 \text{ mg/L}$
83 m: $\delta^{18}\text{O} = -10,5\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = 1.221 \text{ mg/L}$		83 m: $\delta^{18}\text{O} = -12,1\text{‰}$ y $\text{SO}_4 = \text{S/I mg/L}$

Estos datos muestran que las aguas con valores más negativos en $\delta^{18}\text{O}$ tienden a tener menores concentraciones de sulfatos. Esto implicaría que éstas tendrían una menor influencia de las aguas del depósito de lamas, lo que insinúa que la influencia de la pluma del depósito de lamas es mayor en los primeros 50 m del acuífero. Esto considerando que existe una alteración al flujo natural dado por el bombeo.

Las aguas superficiales en el río Ramadillas aguas arriba y aguas abajo de la quebrada La Brea tienen la misma marca isotópica ($\delta^{18}\text{O} = -13,4\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -93\text{‰}$), la cual es cercana a la línea meteórica mundial, siendo más livianas que las aguas de la quebrada La Brea, es decir provendrían de altitudes mayores. Lo mismo sucede con las aguas subterráneas relacionadas al río (WE-2 (29m), vertientes GPLB-3 y GPLB-4). La excepción la daría el pozo WE-2 a 60 y 111 m, cuyas muestras son más pesadas y denotan aguas provenientes probablemente de un sistema acuífero distinto.

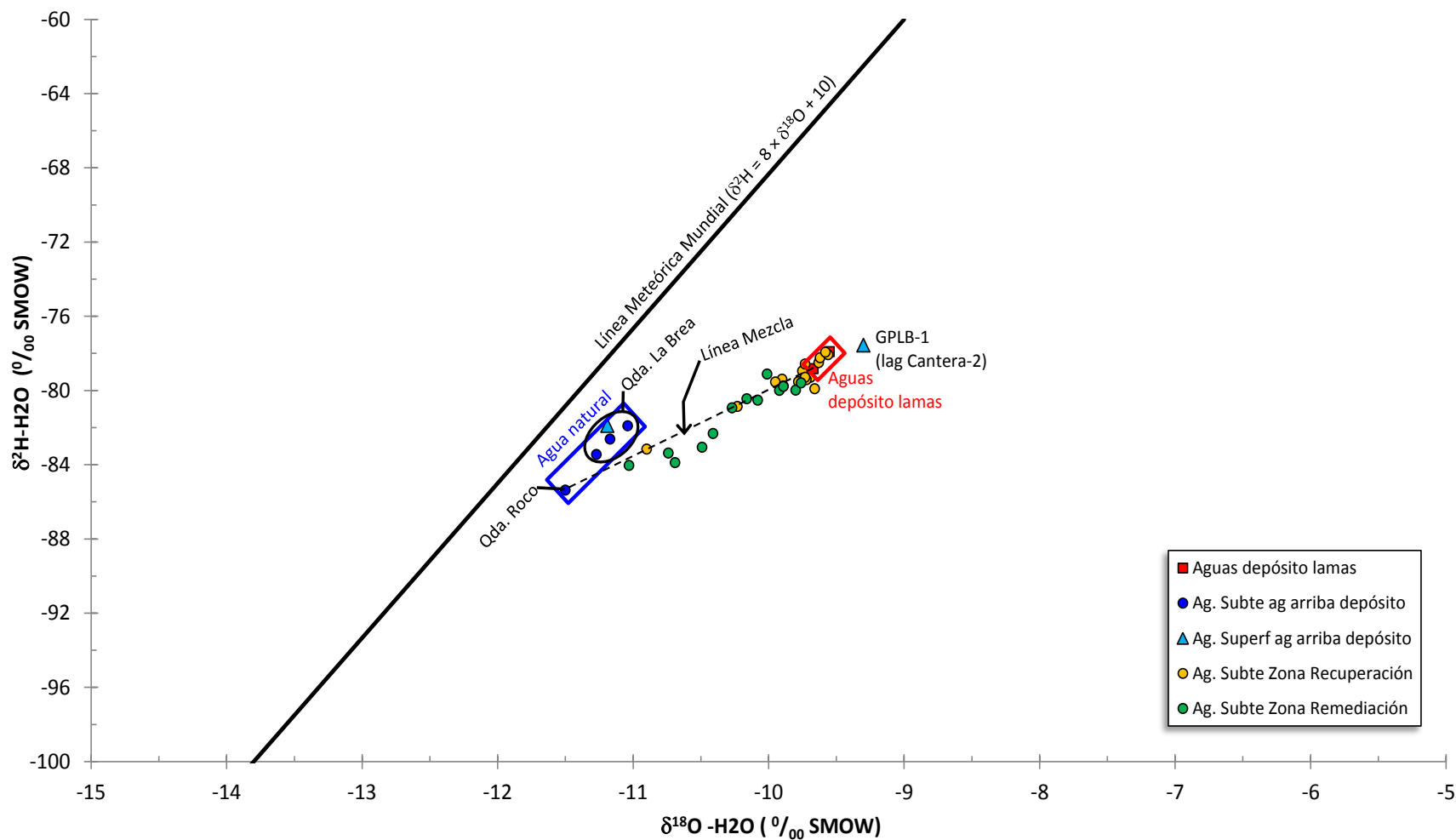


Figura N°5.28: Diagrama Oxígeno-18 vs. Deuterio del agua (Campaña GP, Septiembre 2015).

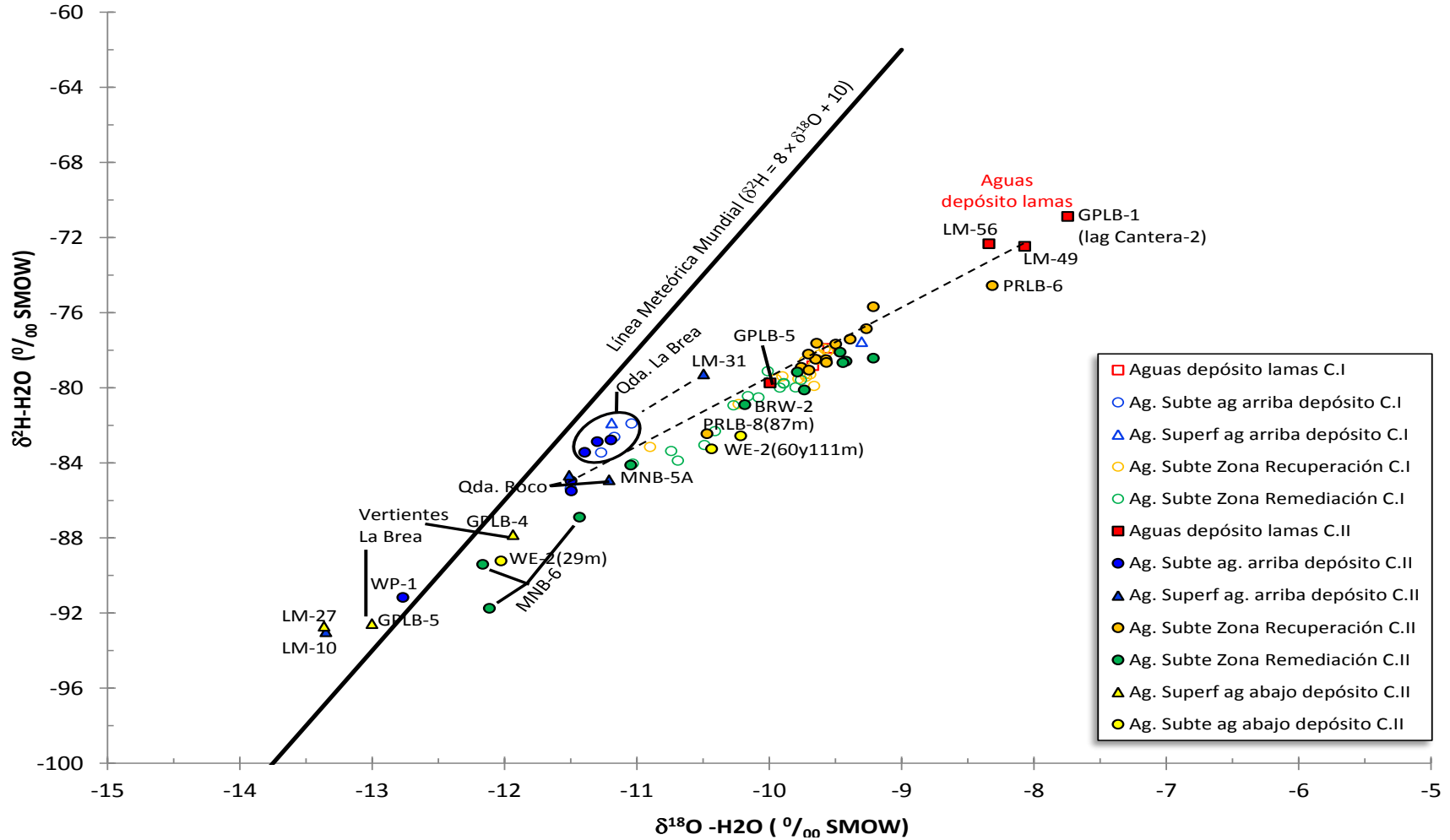


Figura N°5.29: Diagrama Oxígeno-18 vs. Deuterio del agua (ambas campañas).

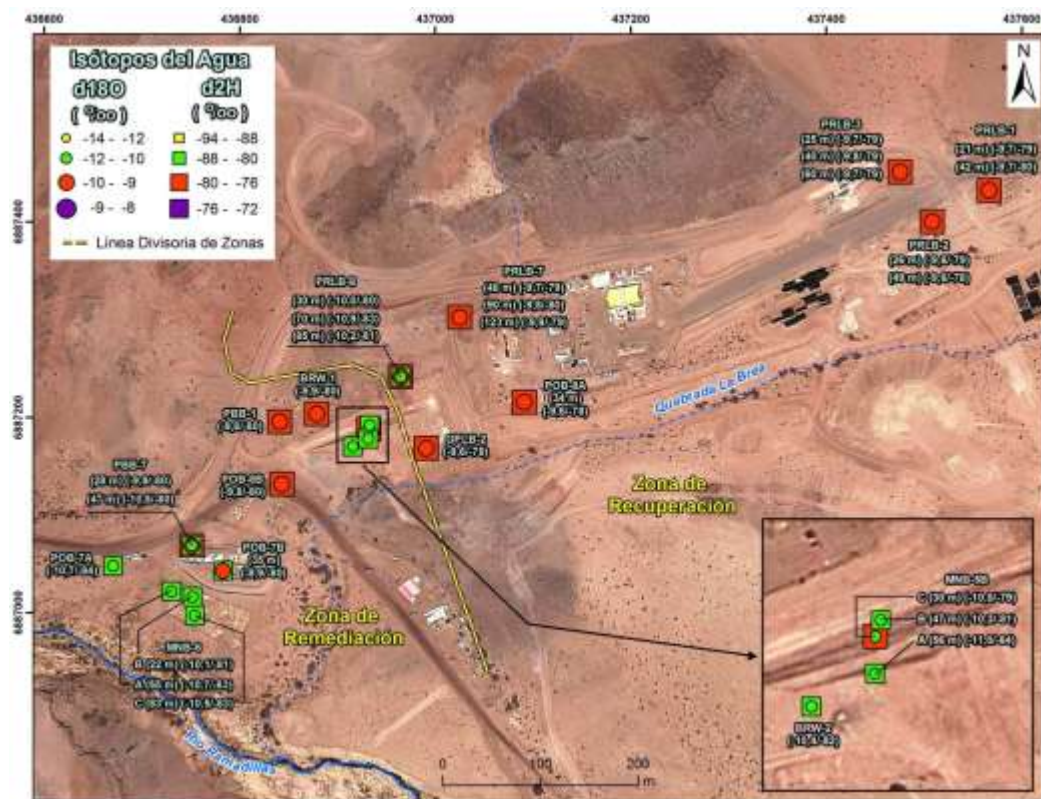


Figura N°5.30: Distribución espacial de O-18 y Deuterio del agua (Campaña GP, Septiembre 2015).

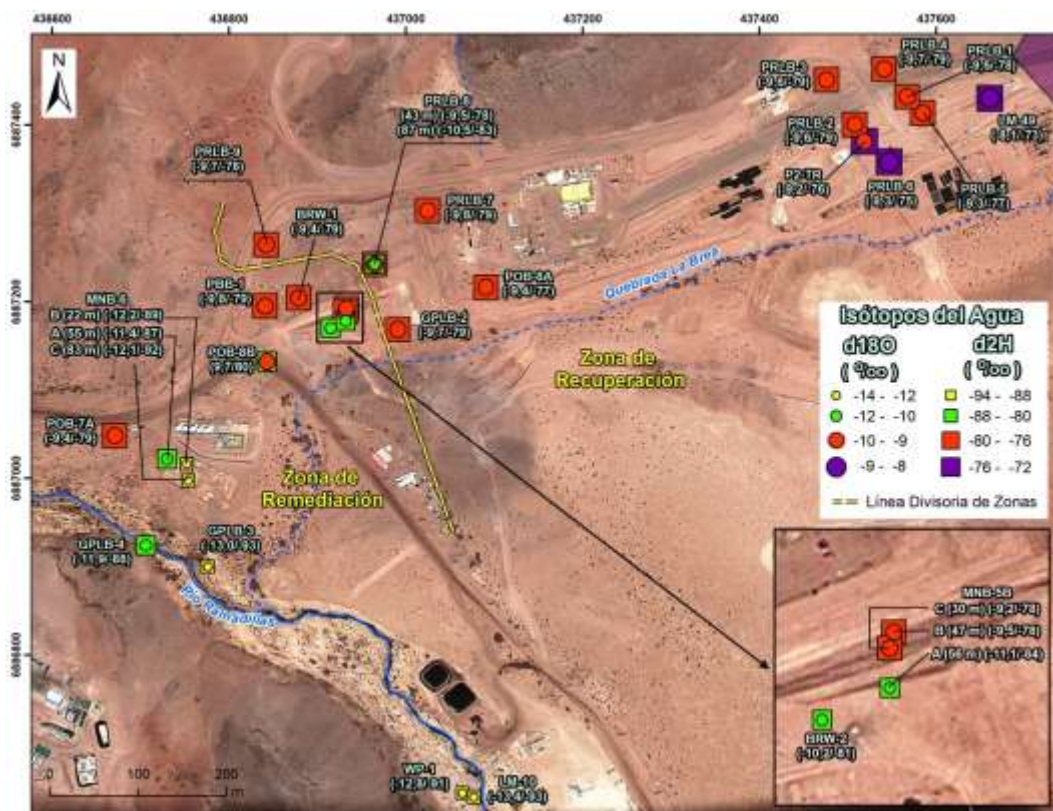


Figura N°5.31: Distribución espacial de O-18 y Deuterio del agua (Campaña GP, Febrero 2016).

En las **Figuras N°5.32 y N°5.33** se aprecia la relación existente entre el isótopo Oxígeno-18 del agua y las concentraciones de sulfatos, existiendo el mismo alineamiento dado por la mezcla entre aguas del depósito de lamas y aguas naturales de las quebradas aguas arriba del depósito. Existe una clara relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y la concentración de sulfatos, en que a medida que las aguas tienden al valor de $\delta^{18}\text{O}$ de las aguas del depósito de lamas se observa una tendencia a un aumento de la concentración de sulfatos asociado al aporte de sulfatos de la pluma del depósito de lamas.

Destaca la alta concentración de sulfatos que tiene la muestra de aguas superficiales de la quebrada La Brea en la Campaña I (803mg/L), la cual es mayor que la de algunos pozos ubicados aguas abajo del depósito de lamas (MNB-5A, MNB-6 y PRLB-8 a mayores profundidades). También son altas las concentraciones de sulfatos del pozo PRLB-3 ($\text{SO}_4=1722\text{mg/L}$ a 60m) en relación a las concentración de sulfatos del agua del depósito de lamas, siendo solamente igualado por el agua de transporte de los relaves (GPLB-5).

Las aguas del río Ramadillas en tanto tienen bajas concentraciones de sulfatos y de O-18 del agua, apartándose completamente de las aguas influenciadas por el depósito de lamas.

Si bien la marca más conservativa en las aguas subterráneas es el isótopo del agua, se observa un gran fraccionamiento de estos isótopos en la segunda campaña al evaporarse en el depósito de lamas. Aunque los sulfatos también varían bastante entre una campaña y otra, representan una menor variación en relación a la diferencia entre muestras de aguas arriba del depósito y aguas del depósito mismo.

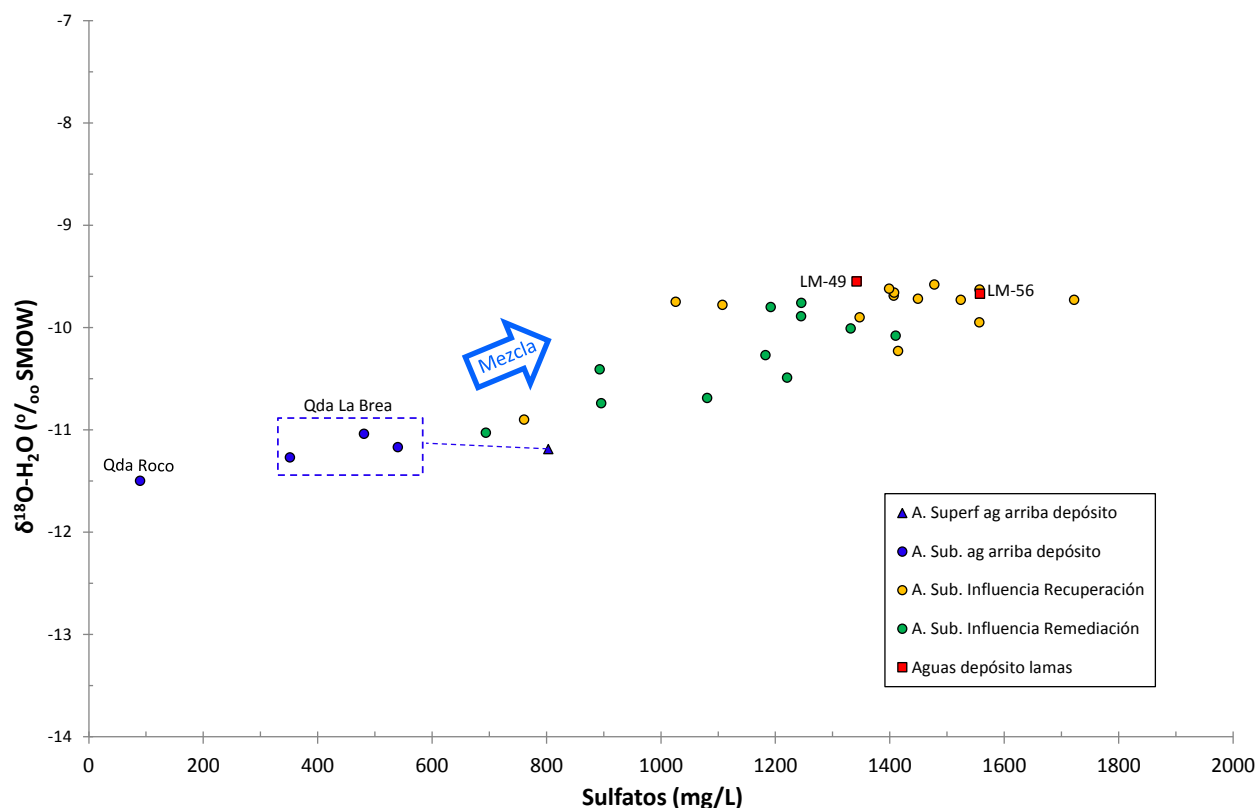


Figura N°5.32: Gráfico de concentración de sulfato v/s $\delta^{18}\text{O}$ del agua (Campaña GP, Septiembre 2015)

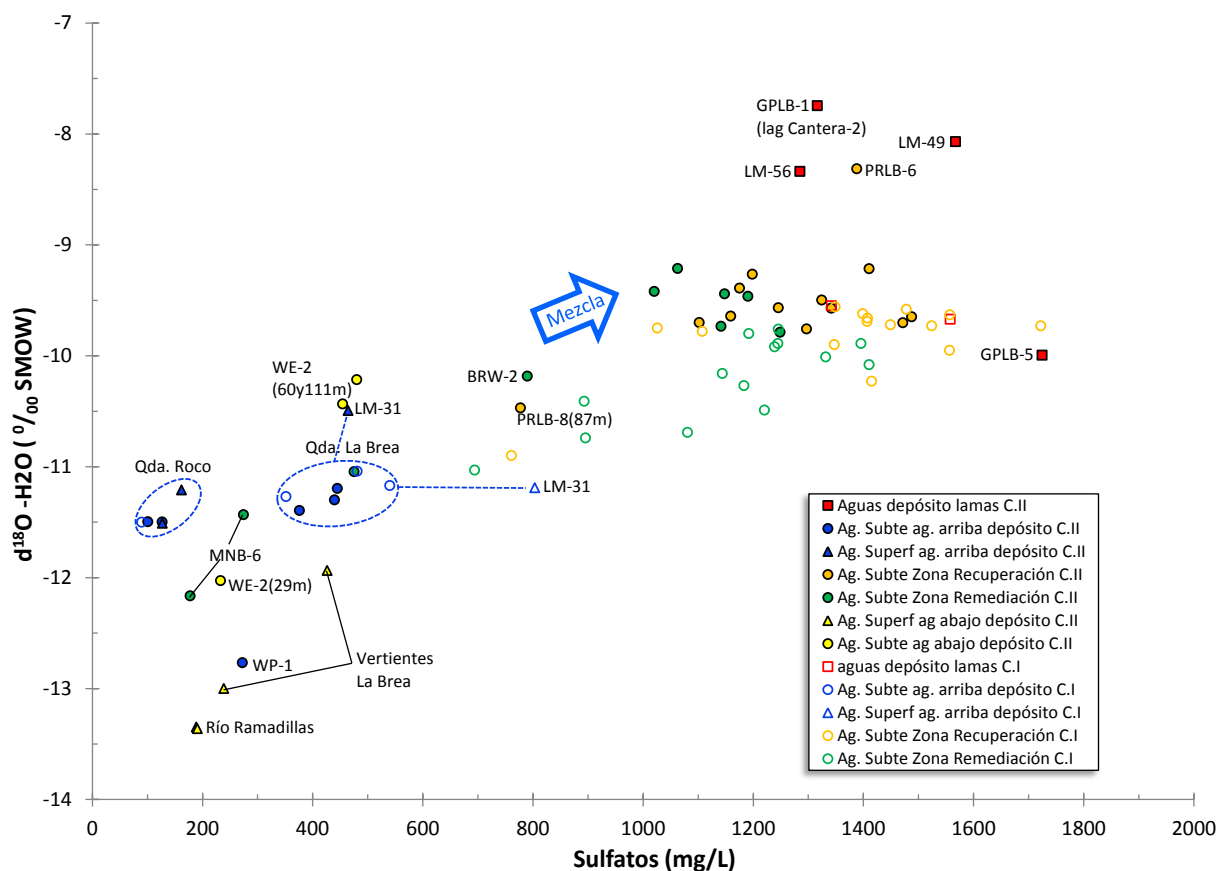


Figura N°5.33: Gráfico de concentración de sulfato v/s $\delta^{18}\text{O}$ del agua (ambas campañas).

5.5.2 Azufre-34 y Oxígeno-18 de los Sulfatos

Los resultados de los análisis de isótopos de los sulfatos se grafican en las **Figura N°5.34** y **N°5.35**.

Los rangos de los valores medidos para cada una de las campañas son los siguientes, siendo bastante más amplios en la Campaña II:

Campaña I:

$\delta^{34}\text{S-SO}_4$: -3,4 a -0,2 ‰

$\delta^{18}\text{O-SO}_4$: -7,2 a 3,8 ‰

Campaña II:

$\delta^{34}\text{S-SO}_4$: -4,5 a 4,4 ‰

$\delta^{18}\text{O-SO}_4$: -10,2 a 8,1 ‰

Al observar la marca de los isótopos del sulfato, se evidencia una clara diferencia en el contenido de O-18 entre los sulfatos de las aguas naturales y las aguas del depósito de lamas. Los sulfatos de las aguas naturales durante la primera campaña se caracterizan por valores de:

Quebrada Roco (1 muestra):

$\delta^{34}\text{S-SO}_4 = -2,8\text{‰}$, y

$\delta^{18}\text{O-SO}_4 = 3,7\text{‰}$

Quebrada La Brea (4 muestras):

$\delta^{34}\text{S-SO}_4$ entre -1,2 y -0,2 ‰, y

$\delta^{18}\text{O-SO}_4$ entre 1,2 y 3,8 ‰

Durante la segunda campaña las aguas naturales tiene una variabilidad mucho mayor, explicado probablemente por un proceso hidrológico de varios aportes (subterráneo y superficial de diferentes altitudes).

Por otra parte, los valores isotópicos de los sulfatos de las aguas del depósito de lamas, se pueden agrupar para ambas campañas de la siguiente forma:

$$\begin{array}{ll} \delta^{34}\text{S-SO}_4 & \text{entre -3,2 y -1,5 ‰} \\ \delta^{18}\text{O-SO}_4 & \text{entre -8,3 y -3,8 ‰} \end{array}$$

Dentro de este rango también quedan las aguas de transporte de los relaves (GPLB-5) muestreados durante la segunda campaña ($\delta^{34}\text{S-SO}_4 = -2,6\text{‰}$, y $\delta^{18}\text{O-SO}_4 = -5,9\text{‰}$) aún cuando no son las aguas más representativas que se infiltran desde el depósito.

Las aguas subterráneas aguas abajo del depósito, también se caracterizan por un rango similar para ambas campañas, sin poder diferenciarse por Zonas. Los valores se encuentran cercanos al rango de aguas del depósito, sin embargo algunas muestras se van acercando un poco hacia las aguas naturales:

$$\begin{array}{ll} \delta^{34}\text{S-SO}_4 & \text{entre -3,4 y -1,5 ‰} \\ \delta^{18}\text{O-SO}_4 & \text{entre -6,9 y -3,9 ‰} \end{array}$$

El rango anterior exceptúa a las muestras del multinivel MNB-6 para la segunda campaña, cuyos valores son más cercanos a las aguas naturales ($\delta^{34}\text{S-SO}_4$ entre -1,8 y +1,8‰, y $\delta^{18}\text{O-SO}_4$ entre -1,9 y +3,3‰).

El rango que presentan los valores de S-34 de las aguas del depósito explican todos los valores medidos en las aguas subterráneas aguas abajo del depósito, no así las aguas naturales ni las aguas del río Ramadillas.

Se identifica un grupo de aguas en que los sulfatos muestran una tendencia a valores más enriquecidos en O-18, que puede estar asociado a una mezcla con aguas naturales representadas por los sulfatos de las quebradas aguas arriba del depósito o bien del río Ramadillas (caso MNB-6). Este efecto es más pronunciado en las aguas más profundas de los pozos PRLB-8, MNB-6 (83m) y MNB-5A (56m). Esto indicaría que en ciertas partes del acuífero hay una mayor influencia de la pluma del depósito de lamas que en la parte más profunda del acuífero. Pero este comportamiento está condicionado por el bombeo de los pozos de la barrera hidráulica que ha cambiado el flujo natural del agua subterránea.

Respecto a las aguas del río Ramadillas, el rango de valores de isótopos de los sulfatos es amplio. Mediante el isótopo S-34 se pueden agrupar las aguas superficiales y las aguas subterráneas aguas arriba y aguas abajo de la quebrada La Brea ($\delta^{34}\text{S-SO}_4$ entre 0,7 y 1,2 ‰), esto a excepción de las dos muestras más profundas del pozo WE-2. En tanto, las vertientes relacionadas con el río Ramadillas (GPLB-3 y GPLB-4) tienen valores de S-34 más cercanas a las aguas de proceso.

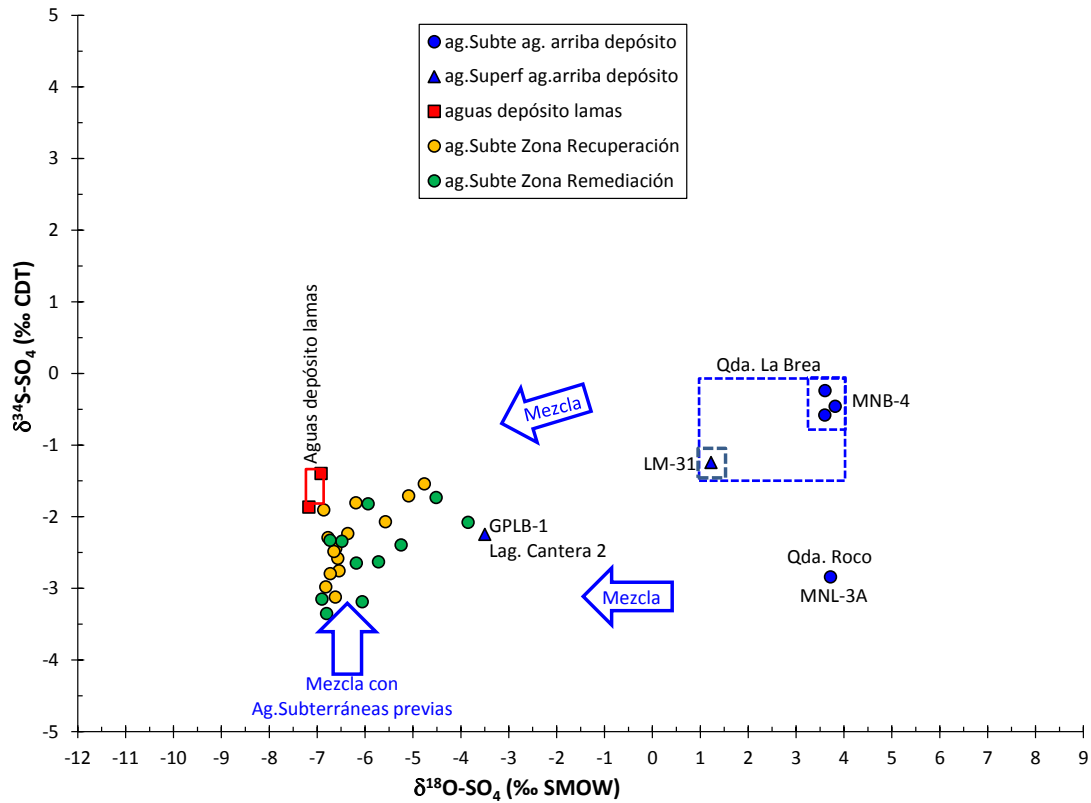


Figura N°5.34: Relación entre valores de $\delta^{34}\text{S-SO}_4$ y $\delta^{18}\text{O-SO}_4$ para muestras de la campaña de Septiembre 2015.

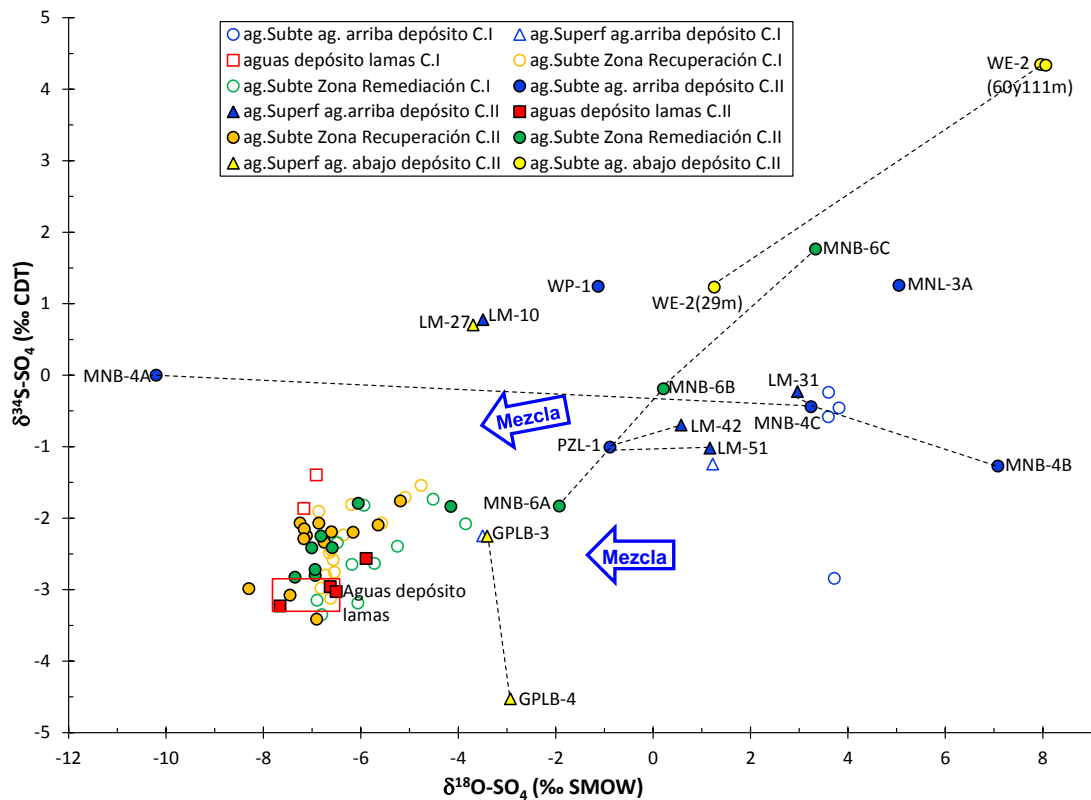


Figura N°5.35: Relación entre valores de $\delta^{34}\text{S-SO}_4$ y $\delta^{18}\text{O-SO}_4$ para muestras de ambas campañas.

5.6 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El aumento de las concentraciones de sulfatos una vez que el depósito de lamas empieza a operar ocurrió desde casi el comienzo pero más lento que el alza de los niveles. A medida que los pozos se alejan del depósito el efecto tardó más en llegar a su máximo y fue menos importante. Esto debido a la capacidad de dilución del acuífero, el cual funciona como un gran volumen de mezcla que recibe este flujo adicional proveniente del tranque de relaves, con altas concentraciones de sulfatos, y que de a poco empieza a aumentar su concentración y va afectando a los pozos desde aguas arriba hacia aguas abajo, dispersándose a medida que avanza (advección + dispersión).

En la **Tabla N°5.2** se muestra la distancia desde el muro del depósito a cada pozo y los meses en que se demora en llegar al peak de concentración de sulfatos. Existe una relación perfectamente lineal entre estas dos variables.

Tabla N°5.2: Tiempo de transporte peak de pluma de agua influenciada.

Punto	Km	Meses
POB-8A	1,5	7
PBB-7	1,9	11
POB-6B	2,3	15

El punto POB-6B es un pozo de monitoreo que se ubica en el sector del río Ramadillas, a la salida de la quebrada La Brea, y que ha tenido un aumento paulatino de sus concentraciones de sulfatos.

En la **Figura N°5.36** se presentan las mediciones de sulfatos obtenidas en las dos campañas desarrolladas por GP.

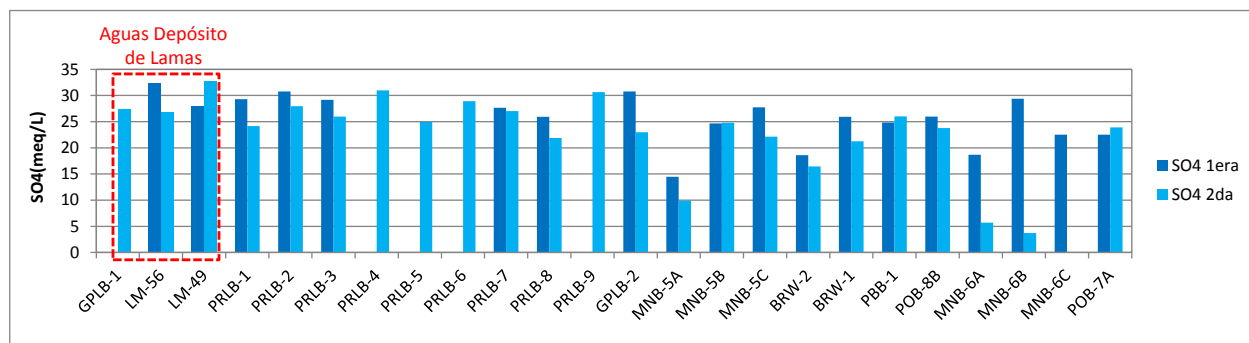


Figura N°5.36: Concentraciones de sulfatos en aguas de proceso y pozos aguas abajo del depósito de lamas.

Debido al funcionamiento de los nuevos pozos de bombeo (PRLB), en la segunda campaña existió un abatimiento de los niveles en el sector de la quebrada La Brea y a la vez un mayor volumen de remoción, lo que en esos pozos no significó una gran variación en sus concentraciones, que desde el comienzo fueron parecidas a las del depósito. En donde si hubo un efecto en las concentraciones fue aguas abajo de esta barrera hidráulica, en la Zona de Remediación, en donde varios pozos bajaron notoriamente sus concentraciones en la segunda

campaña debido probablemente a que empezaron a captar una mayor proporción de aguas profundas no afectadas (Unidad de Rocas Fracturadas).

Lo que se puede suponer, debido a las mediciones de isótopos del agua, es que el agua del río Ramadillas empezó a ingresar por la quebrada La Brea debido al bombeo producido aguas arriba, afectando los pozos de monitoreo MNB-6, los cuales tuvieron mucho menores concentraciones de sulfatos en la segunda campaña. Finalmente, del análisis se desprende que continua escapándose un flujo de aguas afectadas por el borde norte (derecho) de la quebrada, lo que se pudo evidenciar en los pozos PBB-1 y POB-7A, que aumentaron sus concentraciones de una campaña a otra.

Además del transporte en la dirección longitudinal existe un transporte en profundidad que va afectando primero a los pozos más someros ubicados en la Unidad de Sedimentos No Consolidados. Esto se ve demostrado en el pozo de monitoreo MNB-5A en ambas campañas, el cual al ser más profundo y ubicar su tramo ranurado en Roca Fracturada y no estar en la línea de flujo principal, está menos afectado por las aguas provenientes desde el depósito, las cuales ahora por el bombeo influyen menos esta unidad.

También hay un efecto en la transversal al flujo, como se especificó en el punto 5.1. En la Zona de Recuperación, donde se encuentran los pozos de bombeo PRLB-1 al 6, el flujo principal va por la Unidad de Roca Fracturada por ambos lados de la quebrada, de hecho las concentraciones de sulfatos son bastante homogéneas en todos estos pozos. Aguas abajo de la zanja cortafugas existe un mayor escurrimiento de las aguas afectadas hacia el borde norte (derecho) de la quebrada, principalmente por la Unidad de Roca Fracturada, en donde se encuentran los pozos BRW-1, PBB-1, POB-8B, POB-7A, que tienen altas concentraciones de sulfatos en comparación con los pozos BRW-2 y MNB-6, los cuales están ubicados en el borde sur (izquierdo).

En la **Figura N°5.37** se presenta el esquema de funcionamiento del sistema de depósito de laminas de la quebrada La Brea según lo expuesto anteriormente.

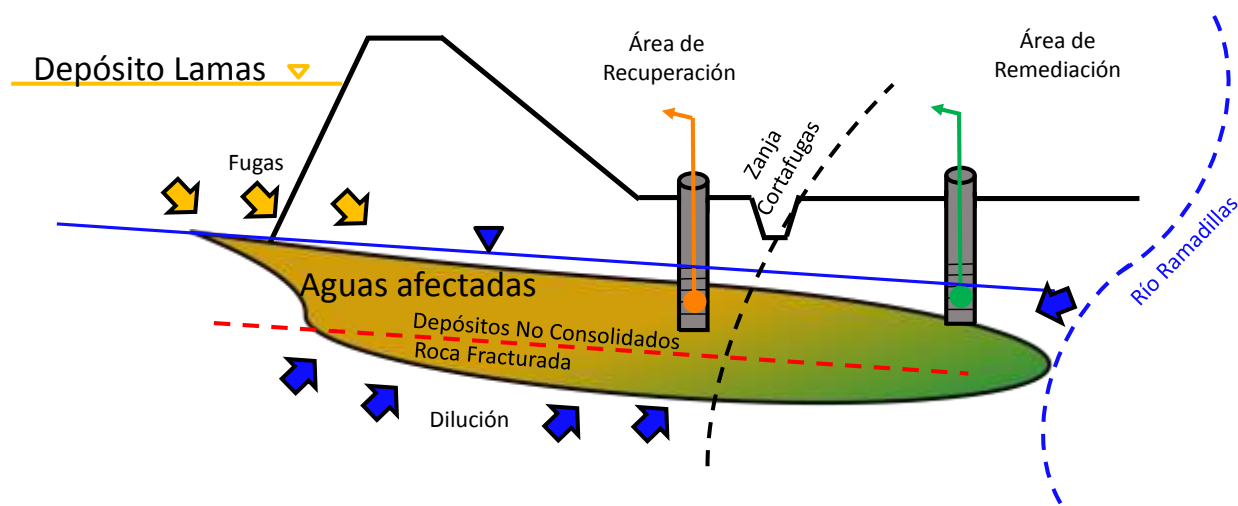


Figura N°5.37: Esquema de funcionamiento de sistema actual en quebrada La Brea.

5.7 RELACIONES ESPACIALES DE MEZCLA

Según lo que se concluye en el punto 5.5.1 (ver **Figura N°5.20**), se nota una gran diferenciación entre las aguas de aguas arriba del depósito (que incluyen al río Ramadillas aguas arriba de la quebrada La Brea) y las aguas del depósito de lamas. Si bien la marca más conservativa en las aguas subterráneas es el isótopo del agua, se observa un gran fraccionamiento de estos isótopos en la segunda campaña al evaporarse en el depósito de lamas. Aunque los sulfatos también varían bastante entre una campaña y otra, representan una menor variación en relación a la diferencia entre muestras de aguas arriba del depósito y aguas del depósito. Es por eso que se prefiere utilizar los sulfatos para las relaciones espaciales de mezcla.

Por lo tanto, se puede tomar el promedio de los valores de sulfatos entre la primera y la segunda campaña, tanto para las muestras aguas arriba del depósito (La Brea, Roco y Ramadillas) como para las aguas del depósito (Aguas Claras y Drenes). Se usa solamente el anión sulfato como marca hidroquímica ya que se puede asumir como conservativo, a diferencia de los cationes presentes. El otro anión mayoritario es el cloruro, sin embargo este no muestra grandes variaciones entre aguas del depósito y aguas influenciadas por el depósito.

El porcentaje de agua natural presente en las aguas será entonces:

$$\% \text{ agua natural muestra} = \frac{C_{\text{Prom A. Depósito}} - C_{\text{Muestra}}}{C_{\text{Prom A. Depósito}} - C_{\text{Prom A. Arriba}}}$$

Donde,

- $C_{\text{Prom A. Depósito}}$: Promedio de SO_4 en las muestras GP representativas del depósito (LM-56 y LM-49) (mg/L)
- $C_{\text{Prom A. Arriba}}$: Promedio de SO_4 en las muestras GP de aguas arriba del depósito (mg/L)
- C_{Muestra} : Corresponde a la concentración de SO_4 en la muestra GP a evaluar (mg/L).

En la **Tabla N°5.3** y en la **Figura N°5.38** se muestra el cálculo del porcentaje de agua natural presente en los pozos de la Zona de Recuperación (naranja) y de la Zona de Remediación (verde) para la primera y la segunda campaña.

Se observa un quiebre cercano al punto GPLB-2 (zanja corta fuga). Aguas arriba de ese punto (incluyéndolo), en la Zona de Recuperación, se ve que el porcentaje de aguas naturales es menor. Entonces, los pozos muestran que las aguas subterráneas existentes en la Zona de Recuperación, entre la zanja y el muro, corresponden prácticamente en su totalidad a aguas del depósito de lamas (las aguas naturales en este sector acuífero representan aproximadamente entre un 5% y un 15% de las aguas totales en las Campañas I y II, respectivamente).

Aguas abajo de la zanja corta fugas, en la Zona de Remediación, el agua natural presenta una mayor participación (aproximadamente un 28% y un 51% de aguas naturales). Por tanto, se constata que la barrera hidráulica, de intercepción de las fugas de agua desde el depósito, está cumpliendo parcialmente su función de extraer las aguas fugadas, y que ha mejorado su operación con la puesta en marcha de los pozos PRLB.

No se observan relaciones espaciales evidentes, transversales a la dirección del flujo. Sin embargo, se atisban ciertos comportamientos que sería necesario confirmar:

- ♦ Se observan mayores porcentajes de agua natural por el lado norte de la quebrada.
- ♦ Se observan mayores porcentajes de agua natural en las muestras de media profundidad (en torno a los 50 m).

Tabla N°5.3: Porcentajes de agua natural (no afectada por el depósito) calculados para las aguas de las Zonas de Recuperación (naranja) y de Remediación (verde).

Pozos a. abajo depósito	1era CAMPAÑA		2da CAMPAÑA	
	SO4 (mg/L)	%Agua Natural	SO4 (mg/L)	%Agua Natural
PRLB-1	1406	1	1159	25
PRLB-2	1478	0	1342	7
PRLB-3	1402	2	1246	17
PRLB-4	S/I	S/I	1488	0
PRLB-5	S/I	S/I	1198	21
PRLB-6	S/I	S/I	1388	3
PRLB-7	1325	9	1297	12
PRLB-8	1243	17	1051	35
PRLB-9	S/I	S/I	1472	0
GPLB-2	1478	0	1102	30
PROMEDIO Zona Recuperación	5		15	
MNB-5A	694	69	475	89
MNB-5B	1183	22	1191	22
MNB-5C	1332	8	1063	34
BRW-2	893	50	790	60
BRW-1	1245	17	1020	38
PBB-1	1192	22	1249	16
POB-8B	1246	17	1142	26
MNB-6A	896	50	274	100
MNB-6B	1411	1	178	100
MNB-6C	1221	19	S/I	S/I
POB-7A	1081	32	1148	26
PROMEDIO Zona Remediación	28		51	

Promedio y rango aguas terminales consideradas:

- ♦ SO4 depósito de lamas: 1421 (1285-1567) mg/L.

- ♦ SO4 a. arriba depósito: 360 (90-803) meq/L.

S/I: Puntos no muestreados en la campaña correspondiente.

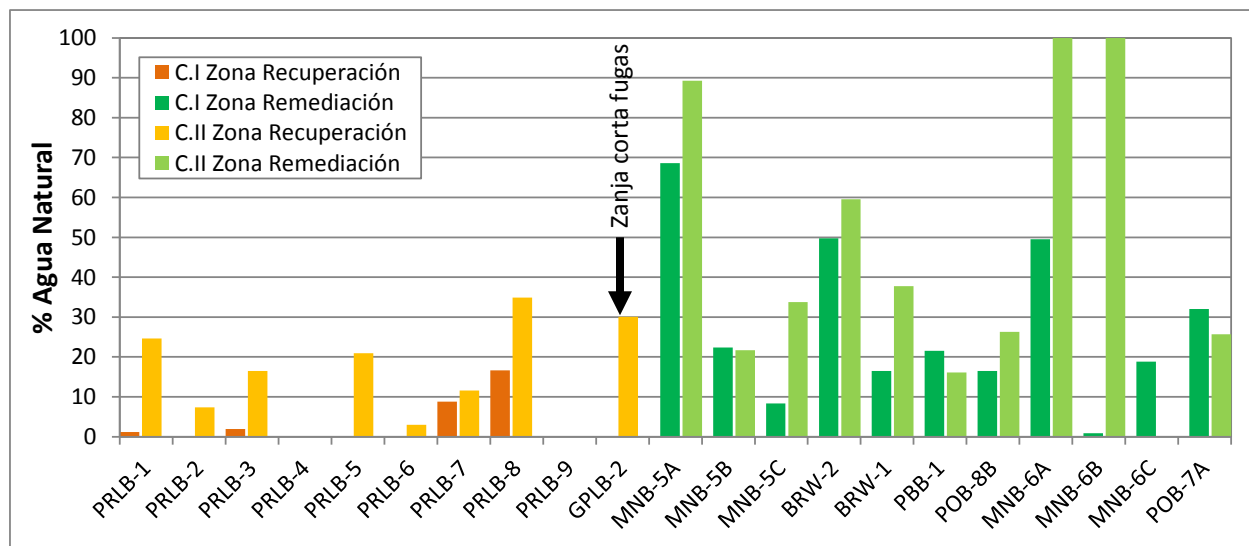


Figura N°5.38: Porcentajes de agua natural en Zonas de Recuperación y de Remedación ambas campañas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis realizado se fundamenta en la siguiente información:

- ◆ Perfiles geofísicos realizados por Geodatos en Mayo 2015 y estratigrafía de pozos construidos en la quebrada La Brea.
- ◆ Mediciones históricas de calidad de aguas efectuadas por MLCC.
- ◆ Mediciones de calidad de aguas (física, química e isotópica) efectuadas por GP en Septiembre de 2015 y Febrero de 2016.
- ◆ Modelo Hidrogeológico La Brea realizado por Schlumberger en Agosto 2016.
- ◆ Modelo de Simulación para Estimación de Infiltraciones Depósito de Lamas La Brea realizado por Arcadis en Agosto 2016.

Cabe señalar que, algunos puntos de muestreo de aguas subterráneas debieron descartarse del análisis, por cuanto algunos pozos presentan masivas incrustaciones en sus tuberías (pozos P2-TR, POB-8A, POB-7B y PBB-7), dando como resultado elevadas concentraciones de sólidos suspendidos, fierro y manganeso, no siendo representativos de la calidad del agua del acuífero. Otros pozos de monitoreo (piezómetros PZLB-1 y 2) tienen calidades muy distintas a lo que se observa en ese sector del acuífero. Ello, probablemente originado en una deficiente limpieza del pozo (desarrollo) posterior a su construcción (realizada en 2015), quedando en su interior aguas traídas desde otros lados para el proceso de la construcción.

Del análisis realizado, se formulan las siguientes conclusiones principales:

6.1 HIDROGEOLOGÍA

Basado en los antecedentes revisados, se definen 3 unidades hidrogeológicas del sistema hidrogeológico de la quebrada La Brea.

- i. **Unidad Sedimentos No Consolidados:** Depósitos cuaternarios de tipo aluvial-coluvial conformados por gravas y arenas gravosas intercaladas con estratos o lentes arcillosos. Esta unidad presenta una media a alta permeabilidad.
- ii. **Unidad Roca Fracturada:** Secuencia de rocas volcano-sedimentarias pertenecientes a las formaciones La Ternera (lavas) y Lagunillas (areniscas, conglomerados, andesitas), de edades triásica y jurásica, respectivamente. Estas rocas poseen una baja permeabilidad primaria, la que aumenta asociada a fracturas (diaclasas), zonas de falla, meteorización, etc.
- iii. **Unidad Basamento Granítico:** Rocas graníticas a sienograníticas de edad paleozoica, impermeable y en zonas de fallas y fracturas, su permeabilidad es muy baja a nula.

De acuerdo a la revisión de antecedentes, lo analizado en los perfiles geofísicos y en la estratigrafía de los pozos de la quebrada La Brea, se tiene un acuífero del tipo libre desarrollado tanto en la Unidad Sedimentos No Consolidados como en la Roca Fracturada.

Hacia el sector del muro del depósito de lamas se infiere que las anomalías geofísicas registradas en el sector Norte estarían asociadas a un flujo con altas concentraciones de sulfatos en Roca Fracturada, mientras que hacia la ladera Sur el flujo se desarrollaría en los Sedimentos No Consolidados.

Hacia aguas abajo (perfil T5), en el sector Norte se observa continuidad de la Unidad Roca Fracturada y de la presencia de altas concentraciones de sulfatos en ella. Hacia el sector Sur, no habría presencia de sulfatos por la Unidad de Roca Fracturada (PZLB-02), sin embargo, no se tienen datos para verificar si ocurre lo mismo en la Unidad de Sedimentos No Consolidados

Hacia el sector del pozo SDL-10, en la ladera Norte aflora un Dique Monzogranito, el cual se registra a los 15 m de profundidad en dicho pozo, generando una barrera hidráulica y desviando el flujo principal hacia el sector Sur, en donde la potencia de los Sedimentos alcanzaría hasta los 50 m de profundidad.

Hacia aguas abajo, en el sector del perfil T4, se registra la Roca Fracturada entorno de los 26 m de profundidad, en donde se tendría la presencia de altas concentraciones en dicha Unidad, tanto por el sector Norte como por el Sur.

Hacia el perfil T3, se registra un aumento de la potencia de los Sedimentos No Consolidados, registrando 34 m hacia el Norte, mientras que hacia el Sur superaría los 55 m. Se evidencia presencia de sulfatos sólo en la Unidad Sedimentos No Consolidados por el sector Norte. Hacia el Sur no se tiene información. En esta zona se registran aportes de aguas superficiales probablemente asociadas a fugas de aguas de manejo industrial y/o riego de caminos.

Hacia el perfil T2, sector de la zanja corta fugas, las anomalías geofísicas continúan en el sector no saturado, probablemente asociadas a aportes superficiales o fugas desde la zanja. Se observa continuidad de la presencia de sulfatos registrados por el sector Sur, en la Unidad de Sedimentos No consolidados. Por el Norte, se registran altas concentraciones de sulfatos tanto en la Unidad Sedimentos No Consolidados como en la Roca Fracturada.

Entre los perfiles T2 y T1, existen algunas inconsistencias respecto de las descripciones estratigráficas, ya que se infiere que existiría un alto del Basamento (Andesita Triásica) que origina en parte que los flujos preferenciales sean por los bordes del valle y en su parte central entre los pozos BRW-1 y PBB-1. Esta situación explicaría la presencia de altas concentraciones de sulfatos tanto en la Unidad de Sedimentos como en la Roca Fracturada en pozos ubicados aguas abajo de la confluencia de la quebrada La Brea con el río Ramadillas.

Si bien se describe la geometría de las unidades hidrogeológicas existen varias incertidumbres respecto de la geometría y continuidad areal de la Unidad Roca Fracturada.

6.2 HIDROQUÍMICA

Los resultados de las mediciones efectuadas por GP en Septiembre de 2015 y Febrero 2016 y las mediciones realizadas por MLCC son muy similares. Esos antecedentes permiten confirmar que el incremento de los niveles del agua subterránea y de las concentraciones de parámetros indicadores, tales como la conductividad eléctrica y los sulfatos, se produce casi inmediatamente luego de la entrada en operación de la planta concentradora y llegada de las lamas al depósito La Brea.

Las aguas muestreadas por GP en Septiembre 2015 y Febrero 2016 se diferencian en: aguas arriba del depósito (aguas naturales), aguas del depósito de lamas (aguas claras y recuperadas en los drenes), pozos ubicados en la Zona de Recuperación (entre el muro del depósito y la zanja corta fuga, incluyéndola) y pozos ubicados en la Zona de Remediación (aguas abajo de la zanja corta fuga y hasta antes del valle del río Ramadillas). En la segunda campaña fueron muestreadas aguas relacionadas con el río Ramadillas aguas arriba y aguas debajo de la quebrada La Brea.

Las aguas naturales (afluentes, que provienen desde aguas arriba del depósito) son representadas por las aguas subterráneas de las dos quebradas afluentes al depósito de lamas: quebrada La Brea y quebrada Roco. La quebrada La Brea tiene aguas sulfatadas-cálcicas, con concentraciones de sulfatos entre 352 y 803 mg/L, mientras que la quebrada Roco tiene aguas bicarbonatadas con concentración de sulfatos entre 90 y 162 mg/L.

Las aguas del depósito de lamas son del tipo sulfatadas-cálcicas, al igual que las aguas subterráneas de los pozos ubicados en la Zona de Recuperación y en la Zona de Remediación. No existen diferencias notorias en sus porcentajes de macroelementos químicos entre esos dos tipos de aguas (aguas del depósito de lamas y aguas subterráneas aguas abajo del depósito), salvo que se observa una menor proporción de magnesio en las aguas del depósito de lamas. La concentración de sulfatos en estos dos tipos de aguas está por lo general sobre los 1000 mg/L. Se exceptúan de este rango las muestras del pozo PRLB 8 a 70m (Campaña I) y a 87m (Campaña II) de tipo sódicas, y el multinivel MNB-6 durante la segunda campaña, las cuales tienen concentraciones de sulfatos de entre 178 y 274 mg/L. Estas aguas también son sulfatadas-cálcicas.

Las aguas relacionadas con el río Ramadillas (subterráneas y superficiales) aguas arriba y aguas abajo de La Brea son del tipo sulfatado-cálcico, con concentraciones de sulfatos entre 189 y 427 mg/L, siendo muy parecidas entre ellas. Esto a excepción de las muestras más profundas del pozo WE-2, las cuales son del tipo cloruradas-sódicas con sulfatos entre 454 y 480 mg/L, probablemente relacionadas a otro sistema acuífero desconectado del río Ramadillas.

La mejor marca química para diferenciar a las aguas del sector es la concentración de sulfatos. Las concentraciones de sulfatos en las aguas naturales (aguas arriba del depósito) están comprendidas entre 89,6 mg/L (Qda Roco) y 803,3 mg/L (Qda La Brea). Las aguas del depósito presentan concentraciones de sulfatos entre 1.342 mg/L y 1.567 mg/L. Las aguas de los pozos ubicados aguas abajo del depósito de lamas, presentan concentraciones de sulfato comprendidos entre 475 mg/L y 1.722 mg/L (sin considerar MNB-6 en Campaña II). Es importante destacar

que las concentraciones de sulfatos en estas aguas, antes de la construcción del depósito de lamas fluctuaban entre 288 mg/L (POB-7A) y 314 mg/L (BRW-1), lo que significa un notable aumento.

Los elementos traza medidos no aportan información que permitan diferenciar entre aguas del depósito de lamas y aguas influenciadas, salvo que las aguas del depósito de lamas presentan mayores concentraciones de molibdeno (0,67 a 0,83 mg/L).

6.3 ISÓTOPOS

Los isótopos del agua, Oxígeno-18 y Deuterio, permiten diferenciar a las aguas de aguas arriba del depósito de lamas de las aguas del depósito de lamas. Las aguas de aguas arriba tienen una composición isotópica muy cercana a la recta meteórica mundial. Las aguas del depósito de lamas (aguas claras y recuperadas por los drenes) muestran una marca isotópica asociada a la evaporación, fraccionándose preferentemente el Oxígeno-18 por sobre el deuterio, con una pendiente de 3,6 (pendiente característica del efecto de evaporación de las aguas). Las aguas subterráneas, de la quebrada La Brea influenciadas por el depósito de lamas, se alinean en una línea de mezcla entre las aguas de aguas arriba (naturales) y las del depósito de lamas. Esto no incluye al pozo MNB-6 durante la Campaña II, el cual se acerca a las aguas relacionadas con el río Ramadillas, suponiéndose influenciado por ellas y no por aguas de la quebrada La Brea. Las aguas relacionadas con el río Ramadillas son más livianas que las aguas naturales del sector La Brea, es decir provendrían de altitudes mayores.

Es importante destacar que en la segunda campaña las aguas del depósito de lamas se ven mucho más evaporadas, obteniéndose muestras más pesadas en ambos isótopos del agua. Si bien las aguas subterráneas de la quebrada La Brea influenciadas por el depósito también se muestran más pesadas en la Campaña II, el enriquecimiento isotópico no es tan grande como con las aguas del depósito.

Respecto a los isótopos de los sulfatos, Azufre-34 y Oxígeno-18, se observa que el isótopo Oxígeno-18 por lo general diferencia a las aguas del sector de aguas arriba del depósito de lamas del resto de las aguas, siendo más pesadas las aguas naturales (a excepción del pozo MNB-4A).

El isótopo Azufre-34 (del SO_4) presenta un gran rango de valores en las aguas naturales (entre -2,8 y 1,3 ‰ CDT), lo cual no permite su diferenciación con las aguas subterráneas de aguas abajo del depósito de lamas. Las aguas del depósito de lamas y las aguas de los pozos de la quebrada La Brea influenciados por el depósito de lamas, presentan ambos valores comprendidos entre -3,4 y -1,5 ‰ CDT. Respecto a las aguas relacionadas con el río Ramadillas estas se pueden agrupar con valores de Azufre-34 entre 0,7 y 1,2 ‰ CDT.

6.4 DIFERENCIACIÓN DE AGUAS

De todos los parámetros indicadores de las aguas del depósito, el sulfato es el que menos cambia entre una campaña y otra, existiendo también una buena diferenciación entre las aguas naturales y las aguas del depósito. Por lo tanto, a través de la concentración de sulfatos se estimó el porcentaje de agua natural presente en los pozos ubicados aguas abajo del depósito de lamas. Desde aguas arriba hacia aguas abajo se observa un quiebre cercano al punto GPLB-2 (zanja

corta fuga). Aguas arriba de ese punto (incluyéndolo), en la Zona de Recuperación, se ve que el porcentaje de aguas naturales es menor. Entonces, los pozos muestran que las aguas subterráneas existentes en la Zona de Recuperación corresponden prácticamente en su totalidad a aguas del depósito de lamas (las aguas naturales en este sector acuífero representan aproximadamente a un 10% de las aguas totales). Entre la primera y la segunda campaña este valor ha aumentado, seguramente debido al efecto de la nueva cortina hidráulica (pozos PRLB).

6.5 RECOMENDACIONES

Respecto a la descripción hidrogeológica, existen varias incertidumbres dadas por la falta de información o posibles errores en los antecedentes utilizados. Lo anterior permitirá optimizar y mejorar el sistema de bombeo en las Zonas de Recuperación y Remediación.

A continuación se detallan cada una de las recomendaciones para solucionar esto:

- ◆ Revisar las descripciones estratigráficas (re-mapeo) de los pozos ubicados entre los perfiles T2 y T1, definiendo bien el contacto entre los Sedimentos No Consolidados y la Roca Fracturada (arenisca).
- ◆ Se identifican 2 tipos de Andesita: una Andesita que forma parte de la secuencia de areniscas y otra, que corresponde a una Andesita Triásica que sobreyace al Basamento Granítico. Esta última con características de impermeable, por lo tanto formaría parte del Basamento. Esta diferenciación no se efectúa, incluyendo siempre a la Andesita como parte de la Unidad Roca Fracturada.
- ◆ Verificar y validar las cotas de los pozos y las registradas en los perfiles geofísicos de Tomografía y NanoTem, estas últimas cotas presentan un error de más de 30 m.
- ◆ Considerando que la Unidad Roca Fracturada (Secuencia de Arenisca y lavas andesíticas) presenta una permeabilidad secundaria asociada al control estructural del sector, en ninguno de los 2 últimos estudios (Schlumberger, 2016 y Arcadis, 2016) se definen lineamientos o estructuras que permitan explicar el flujo por dicha unidad. Por lo anterior, si la Arenisca no ha sido afectada por una estructura, su comportamiento será impermeable formando parte del Basamento.

Se requiere caracterizar en el tiempo todas las aguas iniciales (naturales y del depósito) y que dan origen a la mezcla observada en las aguas subterráneas, ya que de esta forma se puede mejorar la evaluación de los porcentajes de mezcla y validar o rectificar el modelo conceptual de funcionamiento del sistema. En particular, se requiere mejorar la identificación de la “marca isotópica” de las aguas del depósito de lamas, con sus variaciones estacionales, permitiendo mejorar la evaluación del efecto de esas aguas en las aguas subterráneas del sector acuífero existente aguas abajo del depósito de lamas.

Existen muchos pozos de la red de monitoreo de Caserones que se encuentran con importantes grados de incrustación lo que hace que las muestras que se están tomando desde estos pozos no sean representativas. Otros pozos tienen calidades muy distintas según la profundidad a la que se muestrea, por lo tanto es importante ser riguroso con lo exigido a la empresa de monitoreo respecto al método de muestreo.