

DIFERENCIACIÓN DE AGUAS BAJO DEPÓSITO DE LAMAS, PROYECTO CASERONES:

**Análisis con Isótopos Ambientales Estables del Agua
Campaña Febrero 2019**

GP-INF- S-613, Rev. P

Julio 2019

GP Consultores Ltda.®
Recursos Hídricos y Medio Ambiente



**DIFERENCIACIÓN DE AGUAS BAJO DEPÓSITO DE LAMAS,
PROYECTO CASERONES:**

**Análisis con Isótopos Ambientales Estables del Agua
Campaña Febrero 2019**

GP-INF- S-613, Rev. P

Julio 2019

Este estudio ha sido desarrollado bajo los estándares establecidos por un Sistema de Gestión de Calidad aprobado por Bureau Veritas Certification conforme con ISO 9001:2015. Certificado Bureau Veritas Certification: 4018

Elaboró	Revisó	Aprobó
Cristóbal Cox Ing. Civil (Hidráulica), MSc. Julio 2019	Emilio Fernández Ing. Civil (Hidráulica), MSc. Julio 2019	Alejandro Grilli Ing. Civil (Hidráulica) Julio 2019

EQUIPO PROFESIONAL

Alejandro Grilli	: Ing. Civil (Hidráulica)
Emilio Fernández	: Ing. Civil (Hidráulica), MSc.
Cristóbal Cox	: Ing. Civil (Hidráulica), MSc.

INDICE DE MATERIAS

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos del Informe	1
1.2 Antecedentes Generales	1
1.3 Organización del Informe	5
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO	6
2.1 Puntos de Monitoreo	6
2.2 Metodología de Muestreo	10
2.3 Metodología de Análisis	13
3. RESULTADOS	14
3.1 Mediciones de Terreno	14
3.2 Análisis de Laboratorio	15
4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	17
5. CONCLUSIONES	23

1. INTRODUCCIÓN

SCM Minera Lumina Copper Chile (MLCC), requiere identificar y evaluar qué influencia han tenido 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.

Para lo anterior, se efectúa una campaña de muestreo de aguas para análisis de los isótopos ambientales estables del agua Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) y Deuterio ($\delta^2\text{H}$). Se han seleccionado estos isótopos por corresponder a elementos conservativos cuando ingresan al sistema acuífero y pierden contacto con la atmósfera.

La campaña se llevó a cabo entre los días 6 al 11 de Febrero de 2019. En ella se realizaron muestreos de las aguas presentes, tanto del sector aguas arriba del depósito (llamadas “aguas naturales”), como aguas del depósito mismo y del sector aguas abajo.

El presente informe corresponde al análisis de las mediciones efectuadas, las cuales permiten diferenciar las aguas del sistema acuífero que provienen del depósito de lamas, de las aguas naturales de las cuencas de la quebrada La Brea y del río Ramadillas.

1.1 OBJETIVOS DEL INFORME

El objetivo principal del presente informe es identificar y evaluar qué influencia tienen actualmente las fugas de aguas desde el depósito de lamas (en Febrero de 2019), en las aguas subterráneas contenidas en el sistema acuífero de la quebrada La Brea, aguas abajo del depósito de Lamas.

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 de entre 55% a 60%, 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.

Sobre la base del monitoreo del desempeño de este sistema, se identificó la necesidad de potenciar el sistema de remediación, para lo cual se adoptaron las siguientes acciones (Informe Seguimiento PMR Calidad, Dic.17-Ene.18, Caserones, Feb.18):

- 1) Reducción de infiltraciones mediante la disminución del agua acumulada en el depósito de lamas: Se aumentó la capacidad de bombeo desde la cubeta del embalse mediante bombas en balsas que impulsan el agua hasta la piscina de agua fresca de la Estación de Bombeo N°4. El caudal promedio de bombeo en Enero 2018 fue de 273 L/s.

2) Acciones para potenciar el sistema de remediación:

- Potenciamiento de pozos de remediación existentes: Mediante modificaciones en el circuito e instalaciones de bombas de mayor potencia. El caudal promedio de bombeo en Enero 2018 fue de 14,5 L/s.
- Construcción de nuevos pozos de recuperación de agua infiltrada: 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 (PRLB-1 al 6), y 3 complementando el borde norte de esta obra de intercepción (PRLB-7 al 9). El caudal promedio de bombeo en Enero 2018 fue de 16,3 L/s.
- Construcción y operación de la Barrera Principal: En Junio de 2017 comenzó el bombeo de 5 nuevos pozos de recuperación contruidos al pie del muro, cerca de la fuente del agua de contacto (PRLB-10 al 14). El caudal promedio de bombeo en Enero 2018 fue de 83 L/s.

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 del 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 análisis:

- i. 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.
- ii. Zona del Depósito de Lamas: Que incluye las aguas que transportan las lamas, las aguas claras del depósito y las aguas captadas por los drenes.
- iii. Zona de Recuperación Aguas Abajo del Depósito de Lamas: Incluye los nuevos pozos de bombeo (14 pozos PRLB) y la zanja corta fuga.
- iv. 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.
- v. Zona Río Ramadillas Aguas Abajo de la confluencia con quebrada La Brea.

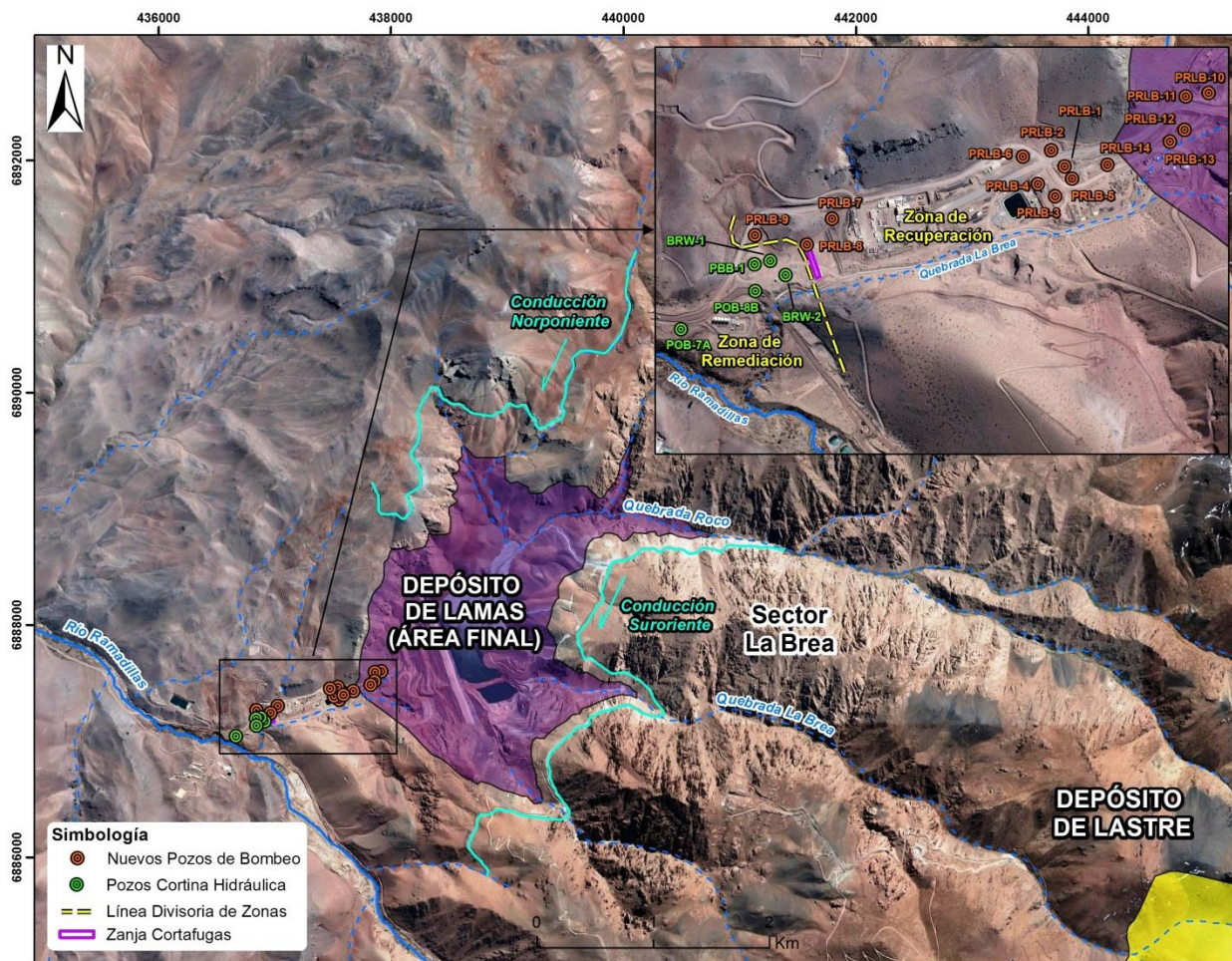


Figura N°1.1: Configuración de instalaciones del proyecto Caserones en la quebrada La Brea.

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: Metodología de Trabajo.

Capítulo 3: Resultados.

Capítulo 4: Discusión de los Resultados.

Capítulo 5: Conclusiones.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1 PUNTOS DE MONITOREO

En el área de estudio se monitorearon en total **52 puntos**, muchos de estos puntos pertenecen al monitoreo regular que efectúa MLCC en el área de las instalaciones del Proyecto Caserones. La elección de estos puntos se efectúa considerando su representatividad para caracterizar las aguas de la quebrada La Brea, el sector Depósito de Lamas y la quebrada Ramadillas, aguas arriba y aguas abajo de su confluencia con la quebrada La Brea.

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

- ◆ Monitoreo de aguas arriba del depósito, 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.
- ◆ Monitoreo de aguas del depósito de lamas, que incluye las aguas claras y las aguas recuperadas por los drenes.
- ◆ Monitoreo en sector de influencia del depósito, correspondiente a la “Zona de Recuperación”, 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”, en puntos ubicados aguas abajo de la zanja corta fuga.
- ◆ Monitoreo en sector de influencia del río Ramadillas, es decir aguas abajo de su confluencia con la quebrada La Brea.

Cabe destacar que las aguas superficiales de las quebradas que fueron monitoreadas en la cuenca La Brea y aguas arriba del depósito, son interceptadas por los canales de contorno. Entonces, su componente subterránea es la que escurriría hacia el sector del depósito y que podría llegar a mezclarse con las aguas que se infiltran desde el depósito de lamas.

Descartando los puntos que se encontraron sin agua, en total se tomaron **muestras para análisis isotópico en 40 puntos**.

En la **Tabla N°2.1** se presentan los puntos de monitoreo de la campaña, junto con sus coordenadas medidas con GPS Navegador (Datum WGS84). De no encontrarse secos o con poca agua, los puntos visitados son muestreados, midiéndose en terreno los parámetros físico-químicos: Temperatura, pH, Conductividad, Oxígeno Disuelto y Sulfatos, y las muestras son

enviadas para análisis de laboratorio isotópico (isótopos del agua). La **Figura N°2.1** presenta la distribución espacial de los puntos incluidos en el monitoreo.

Tabla N°2.1: Puntos de monitoreo campaña Feb-2019.

ID Monitoreo	Descripción	Este (m)	Norte (m)	Matriz
PZL-1	Pozo Zanja Lastre	443.654	6.885.551	Sub
LM-42	Quebrada La Brea en PZL-1	443.816	6.885.394	Sup
LM-31	Quebrada Roco en bocatoma canal interceptor C	441.374	6.888.634	Sup
MNB-4A	Multipiezómetro qda. Roco a. arriba Depósito de Lamas	441.353	6.888.666	Sub
MNB-4B	Multipiezómetro qda. Roco a. arriba Depósito de Lamas	441.353	6.888.666	Sub
MNB-4C	Multipiezómetro qda. Roco a. arriba Depósito de Lamas	441.353	6.888.666	Sub
LM-30	Quebrada La Brea en bocatoma canal interceptor A-2	440.429	6.887.167	Sup
MNL-3A	Multipiezómetro qda. La Brea a. arriba de Depósito de Lamas	440.477	6.887.149	Sub
MNL-3B	Multipiezómetro qda. La Brea a. arriba de Depósito de Lamas	440.479	6.887.150	Sub
MNL-3C	Multipiezómetro qda. La Brea a. arriba de Depósito de Lamas	440.484	6.887.148	Sub
LM-29	Canal interceptor, depósito de lamas	439.529	6.886.342	Sup
LM-35	Quebrada sin nombre en bocatoma canal interceptor	437.835	6.889.191	Sup
LM-34	Quebrada sin nombre en bocatoma canal interceptor	440.108	6.891.195	Sup
LM-33	Quebrada sin nombre en bocatoma canal interceptor	439.499	6.889.927	Sup
LM-32	Quebrada sin nombre en bocatoma canal interceptor	438.407	6.890.064	Sup
GPLB-5	Aguas de transporte de las lamas	SM	SM	De Proceso
LM-56	Aguas Claras Depósito de Lamas	439.316	6.887.504	De Proceso
LM-49	Salida de Drenas Depósito de Lamas	437.661	6.887.430	De Proceso
PRLB-10	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.916	6.887.601	Sub
PRLB-11	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.862	6.887.593	Sub
PRLB-12	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.859	6.887.514	Sub
PRLB-13	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.825	6.887.486	Sub
PRLB-14	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.677	6.887.431	Sub
PRLB-1	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.575	6.887.427	Sub
PRLB-2	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.544	6.887.465	Sub
PRLB-3	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.553	6.887.356	Sub
PRLB-4	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.512	6.887.385	Sub
PRLB-5	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.593	6.887.398	Sub
PRLB-6	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.477	6.887.450	Sub
PRLB-7	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	437.025	6.887.303	Sub
PRLB-8	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	436.965	6.887.242	Sub
PRLB-9	Pozo Cortina Hidráulica La Brea	436.842	6.887.264	Sub
GPLB-2	Zanja Corta Fuga Qda. La Brea	436.991	6.887.168	Sub
MNB-5A	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.932	6.887.178	Sub
MNB-5B	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.933	6.887.192	Sub
MNB-5C	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.932	6.887.188	Sub
BRW-2	Pozo bombeo adicional qda. la Brea a. debajo de Depósito de Lamas	436.915	6.887.170	Sub
BRW-1	Pozo bombeo adicional qda. la Brea a. debajo de Depósito de Lamas	436.879	6.887.204	Sub
PBB-1	Pozo de Remediación por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.841	6.887.195	Sub
POB-8B	Pozo de Remediación por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.843	6.887.132	Sub
MNB-6A	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.730	6.887.022	Sub
MNB-6B	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.752	6.887.016	Sub
MNB-6C	Multipiezómetro por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.754	6.886.997	Sub
POB-7A	Pozo de Remediación por qda. La Brea a. abajo de Depósito de Lamas	436.700	6.887.051	Sub
POB-6B	Pozo Ramadillas Aguas Abajo Qda la Brea	436.361	6.887.094	Sub
GPLB-3	Vertientes La Brea aguas arriba Ramadillas	436.776	6.886.900	Sup
GPLB-4	Vertientes La Brea aguas arriba Ramadillas	436.706	6.886.924	Sup
LM-10	Río Ramadillas aguas arriba de confluencia con Qda. La Brea	437.077	6.886.639	Sup
WP-1	Pozo Bombeo Ramadillas Alto	437.050	6.886.739	Sub
LM-27	Río Ramadillas Aguas Abajo Confluencia Quebrada la Brea	435.877	6.887.230	Sup
POR-05A	Multinivel Río Ramadillas Aguas Abajo La Brea	434.930	6.887.960	Sub
POR-05B	Multinivel Río Ramadillas Aguas Abajo La Brea	434.948	6.887.943	Sub

Nota: En gris se destacan puntos secos o con nivel insuficiente para tomar una muestra.

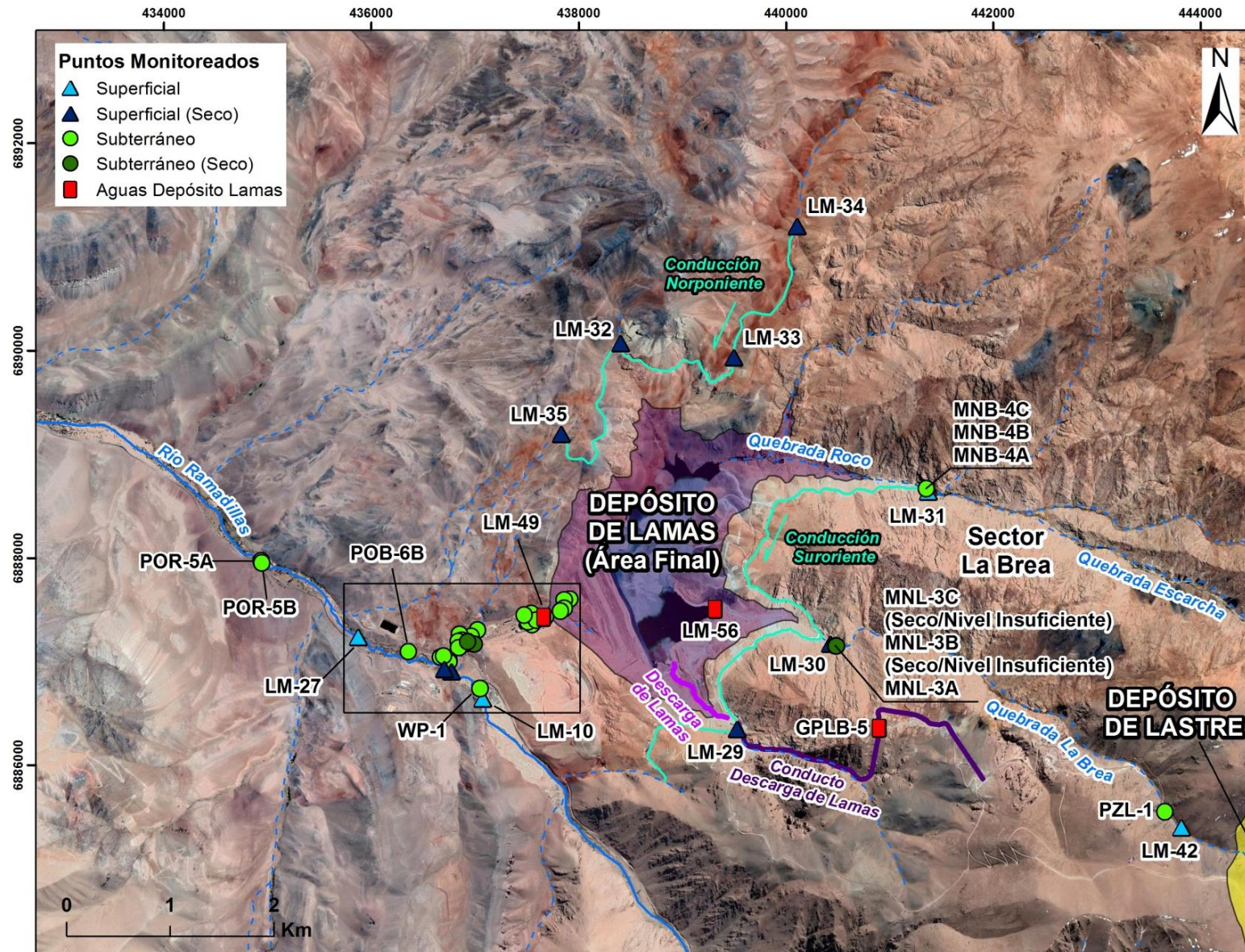


Figura N°2.1(a): Puntos de monitoreo Campaña Febrero-2019.

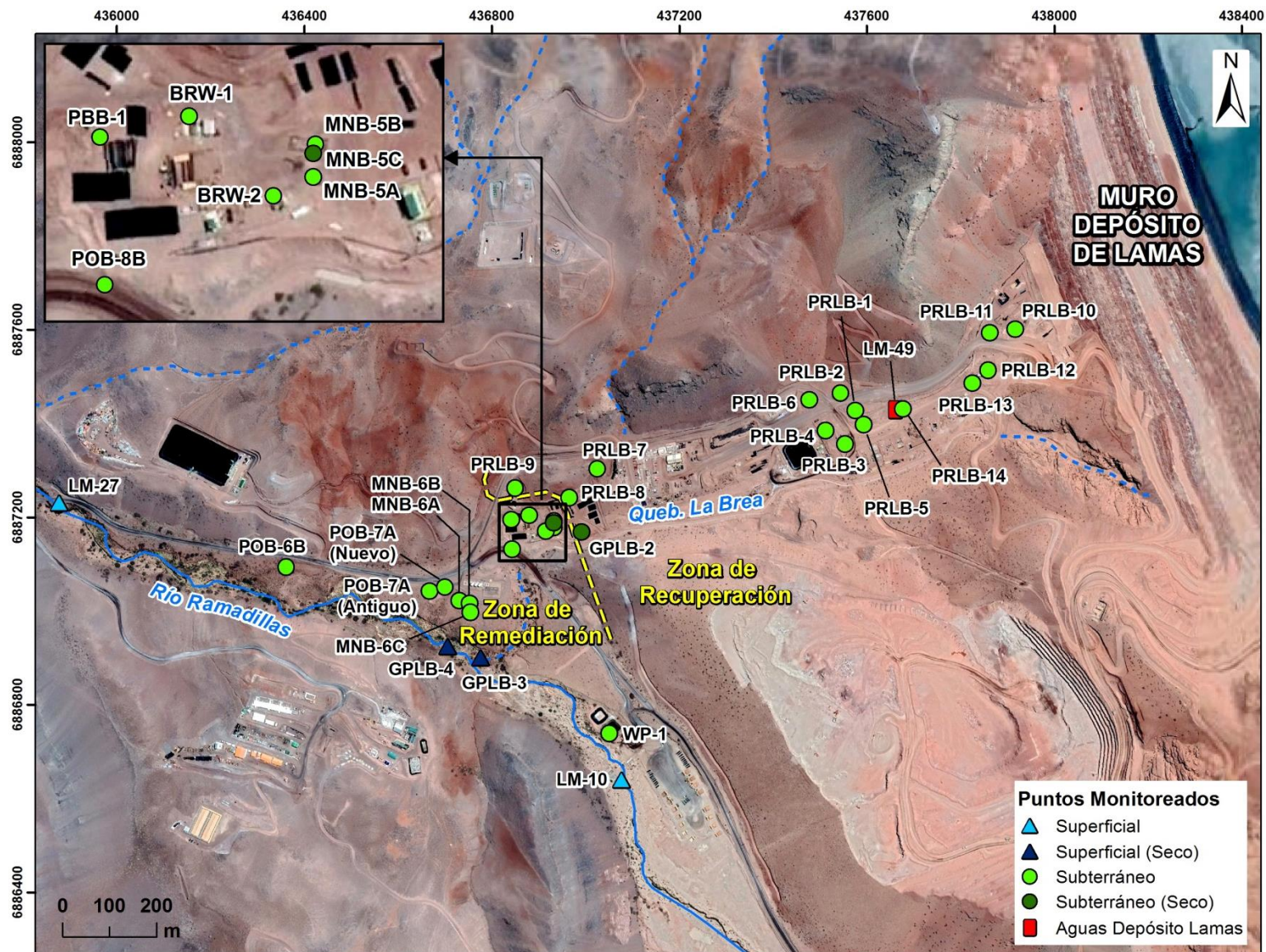


Figura N°2.1(b): Puntos de monitoreo Campaña Febrero-2019.

2.2 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.
- Para las **aguas de proceso** se utilizó un recipiente de acero inoxidable conectado a un brazo telescópico.
- Los **pozos** con bomba instalada fueron muestreados a través de un despiche.
- 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.
- Excepcionalmente, para el muestreo del pozo PZL-1, se utilizó un bailer específico.

La metodología usada para cada una de las muestras tomadas, según matriz de muestreo, se presenta en la **Tabla N°2.2**. Es importante destacar que en la mayoría de los casos en que se utilizó bomba portátil 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, se realizan 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.

Adicionalmente, se midió el **nivel estático** en los pozos de monitoreo y el **caudal** en los puntos de aguas superficiales. 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 nivel y caudal) se encuentra en la **Tabla N°2.2**. En total se tomaron **42 muestras**, ya que en 2 pozos se tomaron muestras a 2 profundidades.

Las muestras para análisis de isótopos del agua fueron enviadas por GP al Laboratorio de Isótopos Ambientales de la Universidad de Waterloo, Canadá.

Tabla N°2.2: Tipo de monitoreo y metodología de muestreo.

ID Monitoreo	Matriz	Número de muestras	Nivel	Caudal	Filmación	Perfilajes OD, T, CE y pH	Método de Muestreo de Aguas
PZL-1	Sub	1	X				Muestreo con bailer específico para este punto a la prof. de NE = 6,6 m
LM-42	Sup	1		X			Directo desde cauce.
LM-31	Sup	1		X			Directo desde orilla.
MNB-4A	Sub	1	X				Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 15 m.
MNB-4B	Sub	1	X				Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 15 m.
MNB-4C	Sub	1	X				Muestreo con bailer a la prof. de NE = 7,8 m
LM-30	Sup	0					Seco, sin escurrimiento
MNL-3A	Sub	1	X				Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 15,5 m
MNL-3B	Sub	0					Seco, sin nivel
MNL-3C	Sub	0					Seco, sin nivel
LM-29	Sup	0					Seco, sin escurrimiento
LM-35	Sup	0					Seco, sin escurrimiento
LM-34	Sup	0					Seco, sin escurrimiento
LM-33	Sup	0					Seco, sin escurrimiento
LM-32	Sup	0					Seco, sin escurrimiento
GPLB-5	De Proceso	1					Muestreo desde Cajón 24. Se deja decantar.
LM-56	De Proceso	1					Brazo Telescópico desde orilla.
LM-49	De Proceso	1					Brazo Telescópico desde orilla, donde descarga el agua de las tuberías
PRLB-10	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-11	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-12	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-13	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-14	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-1	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-2	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-3	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo. Llenar Bidón auxiliar, porque pozo tiene muy poco nivel. Se apaga. Personal de CEI es quien enciende las bombas en el momento de muestreo.
PRLB-4	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-5	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-6	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo. Llenar Bidón auxiliar, porque pozo tiene muy poco nivel. Se apaga. Personal de CEI es quien enciende las bombas en el momento de muestreo.

ID Monitoreo	Matriz	Número de muestras	Nivel	Caudal	Filmación	Perfilajes OD, T, CE y pH	Método de Muestreo de Aguas
PRLB-7	Sub	1					Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-8	Sub	1					Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PRLB-9	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
GPLB-2	Sub	0					No muestreado: Bombas apagadas (nivel insuficiente).
MNB-5A	Sub	1	X				Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 56 m. Con bomba SGS.
MNB-5B	Sub	1	X				Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 47 m
MNB-5C	Sub	0	X				GP NO toma muestras, ya que el NE está por debajo del Ranurado. SGS toma muestras con bomba a los 35 m. Con bomba SGS
BRW-2	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
BRW-1	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
PBB-1	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
POB-8B	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
MNB-6A	Sub	1	X				Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 53 m. Con bomba SGS.
MNB-6B	Sub	1	X				Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 24 m. Con bomba SGS.
MNB-6C	Sub	1	X				Botella Muestreadora Vertical a 83 m (envase auxiliar)
POB-7A	Sub	1	X				Despiche de bomba instalada luego de 1 min de ambientación a todo flujo
POB-6B	Sub	2	X		X	X	Botella Muestreadora Vertical a 25 m y 45 m (envase auxiliar)
GPLB-3	Sup	0					Seco, sin escurrimiento
GPLB-4	Sup	0					Seco, sin escurrimiento
LM-10	Sup	1		X			Directo desde cauce.
WP-1	Sub	1					Muestreo en tubería de descarga de la piscina
LM-27	Sup	1		X			Directo desde cauce.
POR-05A	Sub	2			X	X	Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 12 m y 31 m
POR-05B	Sub	1			X		Estabilización de parámetros con LFPS, con bomba portátil instalada a 44 m

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

2.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

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 en la zona de recarga, 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.

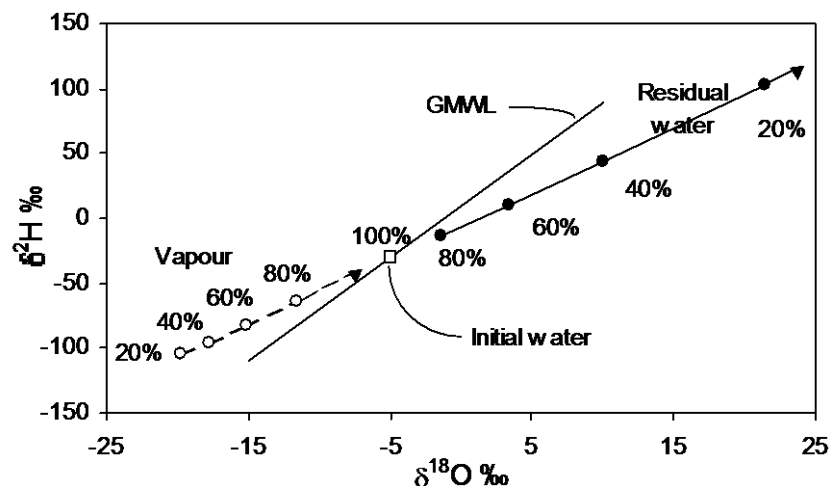


Figura N°2.2: Línea Meteorológica Mundial (GMWL) y efecto de la evaporación en la composición Isotópica (Clark y Fritz, 1997).

3. RESULTADOS

3.1 MEDICIONES DE TERRENO

En las **Tablas N°3.1 a N°3.3** se presentan las mediciones puntuales de terreno en aguas superficiales, subterráneas y en aguas del Depósito de Lamas, respectivamente.

Tabla N°3.1: Parámetros físico-químicos medidos en terreno para Aguas Superficiales.

ID Monitoreo	Fecha	Hora	Q (L/s)	C.E. (μS/cm)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH	Temp. ⁽¹⁾ (°C)	SO ₄ (mg/L)
LM-42	11/02/2019	18:00	1,3	967	2,38	8,52	14,19	470
LM-31	06/02/2019	19:21	1,1	1050	3,94	7,90	18,01	525
LM-10	07/02/2019	16:53	411	619	3,73	8,32	18,82	198
LM-27	07/02/2019	18:18	462	624	3,84	8,34	19,02	185

⁽¹⁾ Corregido por contrastación.

Tabla N°3.2: Parámetros físico-químicos medidos en terreno para Aguas Subterráneas.

ID Monitoreo	Fecha	Hora	N.E. (m.bnb)	Profundidad muestra (mbnb)	C.E. (μS/cm)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH	Temp. (°C)	SO ₄ (mg/L)
PZL-1	11/02/2019	18:24	6,626 ⁽¹⁾	6,6	980	-	7,78	8,26 ⁽¹⁾	430
MNB-4A	06/02/2019	17:34	7,84	15,0	820	-	7,26	20,93 ⁽¹⁾	330
MNB-4B	06/02/2019	18:00	8,44	15,0	776	-	7,07	17,91 ⁽¹⁾	310
MNB-4C	06/02/2019	18:17	7,76	7,8	765	-	7,10	15,50 ⁽¹⁾	270
MNL-3A	07/02/2019	11:21	13,88	15,5	796	4,21	7,67	15,86 ⁽¹⁾	190
PRLB-10	06/02/2019	9:50	16,89	N/A	3474	-	7,14	16,93 ⁽¹⁾	1770
PRLB-11	06/02/2019	10:03	14,28	N/A	3375	-	7,17	17,02 ⁽¹⁾	1680
PRLB-12	06/02/2019	10:34	26,09	N/A	3393	-	7,26	17,42 ⁽¹⁾	1710
PRLB-13	06/02/2019	10:46	-	N/A	3432	-	7,29	18,02 ⁽¹⁾	1700
PRLB-14	06/02/2019	11:07	24,21	N/A	3422	-	7,37	17,42 ⁽¹⁾	1610
PRLB-1	06/02/2019	12:15	34,98	N/A	3254	-	7,49	16,83 ⁽¹⁾	1630
PRLB-2	06/02/2019	15:07	48,16	N/A	3205	-	7,44	19,32 ⁽¹⁾	1550
PRLB-3	06/02/2019	15:51	43,07	N/A	3367	-	7,30	24,21 ⁽¹⁾	1670
PRLB-4	06/02/2019	11:59	51,74	N/A	3262	-	7,26	17,42 ⁽¹⁾	1600
PRLB-5	06/02/2019	11:40	44,43	N/A	3388	-	7,43	18,42 ⁽¹⁾	1680
PRLB-6	06/02/2019	15:26	29,45	N/A	2669	-	7,11	17,32 ⁽¹⁾	1310
PRLB-7	06/02/2019	12:35	49,90	N/A	3023	-	7,46	16,83 ⁽¹⁾	1480
PRLB-8	06/02/2019	12:54	-	N/A	3077	-	7,40	18,02 ⁽¹⁾	1610
PRLB-9	06/02/2019	13:43	56,14	N/A	3097	-	7,55	16,73 ⁽¹⁾	1520
MNB-5A	08/02/2019	9:39	47,78	56,0	984	3,10	7,48	19,70	360
MNB-5B	08/02/2019	10:16	34,40	47,0	2870	2,10	7,24	19,95	1590
BRW-2	06/02/2019	13:11	53,24	N/A	1735	-	7,68	17,02 ⁽¹⁾	690

ID Monitoreo	Fecha	Hora	N.E. (m.bnb)	Profundidad muestra (mbnb)	C.E. (μS/cm)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH	Temp. (°C)	SO ₄ (mg/L)
BRW-1	06/02/2019	13:31	46,03	N/A	3130	-	7,39	16,83 ⁽¹⁾	1460
PBB-1	06/02/2019	13:59	37,43	N/A	3087	-	7,52	17,32 ⁽¹⁾	1510
POB-8B	06/02/2019	14:10	39,33	N/A	2927	-	7,58	18,12 ⁽¹⁾	1430
MNB-6A	08/02/2019	12:22	22,62	53,0	817	1,15	7,71	20,73	260
MNB-6B	08/02/2019	11:54	22,29	24,0	704	1,75	7,55	20,36	225
MNB-6C (83m)	10/02/2019	11:52	21,644 ⁽¹⁾	83,0	1078	5,65	8,77	19,60	320
POB-7A (Nuevo)	06/02/2019	14:29	51,34	N/A	1100	-	7,83	17,42 ⁽¹⁾	390
POB-6B (25m)	11/02/2019	11:10	10,63	25,0	1869	5,46	8,00	11,70	865
POB-6B (45m)	11/02/2019	11:50	10,63	45,0	1849	3,99	8,17	13,10	850
WP-1	07/02/2019	16:30	17,71	N/A	748	-	7,61	17,51 ⁽¹⁾	198
POR-5A (12m)	10/02/2019	16:12	8,595 ⁽¹⁾	12,0	784	3,51	7,26	19,70	280
POR-5A (31m)	10/02/2019	16:52	8,595 ⁽¹⁾	31,0	789	3,33	7,21	18,40	260
POR-5B	10/02/2019	18:25	9,941 ⁽¹⁾	44,0	903	1,09	7,88	22,90	245

⁽¹⁾ Corregido por contrastación.

Tabla N°3.3: Parámetros físico-químicos medidos en terreno para aguas depósito de lamas.

ID Monitoreo	Fecha	Hora	C.E. (μS/cm)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	pH	Temp. (°C)	SO ₄ (mg/L)
GPLB-5	11/02/2019	13:35	3014	2,86	8,28	17,30	1650
LM-56	06/02/2019	19:48	3976	3,41	8,84	24,24 ⁽¹⁾	2055
LM-49	06/02/2019	11:24	3466	4,41	7,48	19,82 ⁽¹⁾	1630

⁽¹⁾ Corregido por contrastación.

3.2 ANALISIS DE LABORATORIO

El análisis de Oxígeno-18 y Deuterio del agua se realizó en el laboratorio de isótopos ambientales de la Universidad de Waterloo (Canadá). Los resultados se presentan en la **Tabla N°3.4** para la campaña de Febrero 2019.

Tabla N°3.4a: Resultados isótopos del muestreo en aguas superficiales realizado por GP.

ID Monitoreo	δ ² H-H ₂ O	δ ¹⁸ O-H ₂ O
	‰ VSMOW ± 0,8‰	‰ VSMOW ± 0,2‰
LM-42	-82	-11,2
LM-31	-78	-10,6
LM-10	-91	-13,3
LM-27	-91	-13,3

Tabla N°3.4b: Resultados isótopos del muestreo en aguas subterráneas realizado por GP.

ID Monitoreo	$\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$
	‰ VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$	‰ VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$
PZL-1	-82	-11,3
MNB-4A	-85	-11,4
MNB-4B	-84	-11,5
MNB-4C	-83	-11,3
MNL-3A	-84	-11,1
PRLB-10	-68	-7,5
PRLB-11	-72	-8,1
PRLB-12	-70	-7,9
PRLB-13	-71	-8,0
PRLB-14	-73	-8,5
PRLB-1	-75	-8,6
PRLB-2	-77	-9,2
PRLB-3	-70	-7,4
PRLB-4	-75	-8,7
PRLB-5	-72	-8,3
PRLB-6	-80	-10,2
PRLB-7	-76	-9,1
PRLB-8	-76	-9,0
PRLB-9	-75	-8,8
MNB-5A	-88	-12,2
MNB-5B	-73	-8,7
BRW-2	-84	-10,8
BRW-1	-75	-8,8
PBB-1	-75	-8,9
POB-8B	-76	-9,1
MNB-6A	-90	-12,8
MNB-6B	-91	-13,0
MNB-6C (83m)	-92	-12,7
POB-7A (Nuevo)	-91	-12,3
POB-6B (25m)	-83	-10,8
POB-6B (45m)	-85	-11,1
WP-1	-92	-13,0
POR-5A (12m)	-90	-12,5
POR-5A (31m)	-90	-12,6
POR-5B	-88	-11,2

Tabla N°3.4c: Resultados isótopos del muestreo en aguas del depósito de lamas realizado por GP.

ID Monitoreo	$\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$
	‰ VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$	‰ VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$
GPLB-5	-80	-10,4
LM-56	-58	-5,1
LM-49	-71	-8,0

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados de los análisis de isótopos del agua se presentan en el gráfico $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ de la **Figura N°4.1**. Se incluye la línea meteórica mundial como referencia ya que no hay datos para definir la línea meteórica local del área de estudio, pero en Chile en general estas dos líneas no son muy diferentes (Squeo et al., 2006¹).

La distribución espacial del isótopo Oxígeno-18 en la quebrada La Brea, aguas abajo del depósito de lamas, se exhibe en **Figura N°4.2**.

Respecto a los resultados obtenidos en la campaña de Feb-2019, se observa un amplio rango de valores (**Tablas N°3.4**) que varían entre -13,2 y -5,1 ‰ y entre -92 y -58 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente.

Las aguas más enriquecidas isotópicamente corresponden a las aguas claras del depósito de lamas (LM-56), con valores de $\delta^{18}\text{O} = -5,1\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -58\text{‰}$. Estas aguas se encuentran en el extremo superior de la relación lineal que corresponde a la línea de evaporación para el depósito de lamas La Brea, y que parte de ellas son interceptadas por los drenes (LM-49).

Las aguas del depósito de lamas quedan identificadas con la siguiente marca isotópica (ver **Tablas N°3.4**), en el muestreo de Feb-2019:

- ◆ Aguas Claras (LM-56): $\delta^{18}\text{O} = -5,1\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -58\text{‰}$
 $\text{SO}_4 = 2.055 \text{ mg/L}$ (medición de terreno)
- ◆ Drenes (LM-49): $\delta^{18}\text{O} = -8,0\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -71\text{‰}$
 $\text{SO}_4 = 1.630 \text{ mg/L}$ (medición de terreno)
- ◆ Aguas transporte lamas (GPLB-5): $\delta^{18}\text{O} = -10,4\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -80\text{‰}$
 $\text{SO}_4 = 1.650 \text{ mg/L}$ (medición de terreno)

Teniendo en cuenta la marca de las aguas que transportan las lamas (GPLB-5) y su ubicación respecto a la línea meteórica (**Figura N°4.1**), estas aguas ya han sufrido un proceso de evaporación antes de llegar al depósito de lamas, dado probablemente por su permanencia en piscinas o lagunas del sistema de recirculación de aguas de Caserones.

¹ Squeo, F.A., Aravena, R., Aguirre, E., Pollastri, A., Jorquera, C.B., and Ehleringer, J.R. 2006. Groundwater dynamics in a coastal aquifer in North-Central Chile: Implications for groundwater recharge in an arid ecosystem. Journal of Arid Environment, 67: 240-254.

Las aguas subterráneas que se encuentran en las quebradas aguas arriba del depósito de lamas (aguas naturales) quedan identificadas con la siguiente marca isotópica (ver **Tablas N°3.4**), en el muestreo de Feb-2019:

- Aguas de Quebrada Roco: $\delta^{18}\text{O}$ entre -11,4 y -10,6 ‰
 $\delta^2\text{H}$ entre -85 y -78 ‰
 SO_4 entre 270 y 525 mg/L (medición de terreno)
- Aguas de Quebrada La Brea (una muestra): $\delta^{18}\text{O} = -11,1$ ‰
 $\delta^2\text{H} = -84$ ‰
 $\text{SO}_4 = 190$ mg/L (medición de terreno)

Estas aguas están ubicadas en el extremo inferior de la línea de evaporación y se encuentran muy cercanas a la línea meteórica (**Figura N°4.1**).

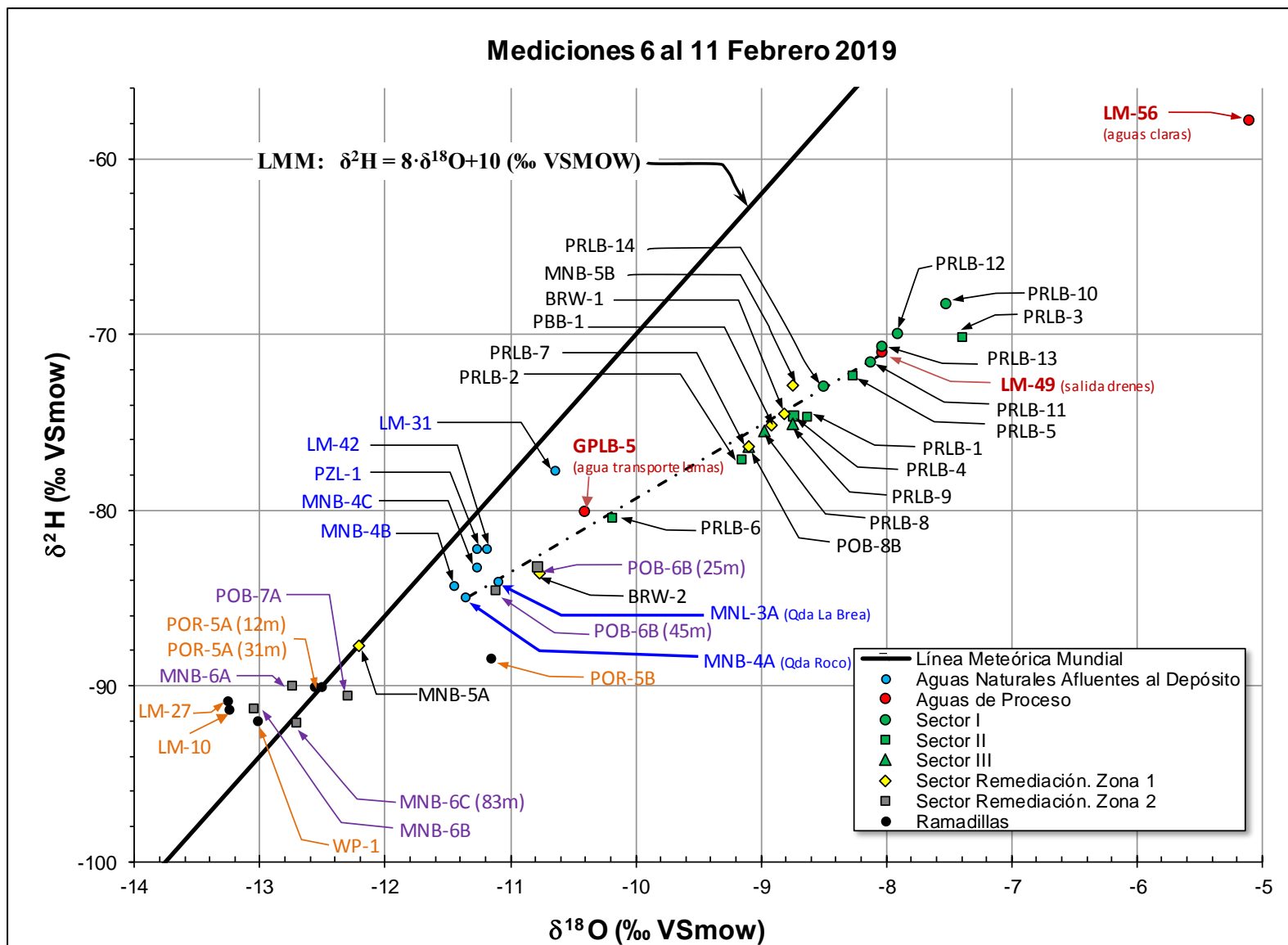
Mezcla de aguas en el sistema acuífero de la quebrada La Brea, aguas abajo del depósito de lamas.

La composición isotópica de las aguas ubicadas entre el depósito de lamas y el río Ramadillas, se ubica entre dos extremos representados por las aguas naturales y las aguas del depósito de lamas o “Aguas de Proceso”, formando una línea de mezcla entre los correspondientes “end-member” representativos (ver **Figura N°4.1**).

Las “Aguas de Proceso” corresponden a las aguas del depósito de lamas. Son caracterizadas por la composición isotópica medida en las aguas a la salida de los Drenes del Depósito de Lamas (LM-49), (**Figura N°4.1**), definiéndose así el “end-member” de las aguas de proceso.

En el otro extremo de la línea de mezcla se identifica el “end-member” de las aguas naturales de la quebrada Roco, específicamente el punto MNB-4A (**Figura N°4.1**).

“end-member”	$\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ VSmow	$\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ VSmow	Base de Cálculo
Agua de Proceso	-8,0	-71	LM-49
Agua Natural	-11,4	-85	MNB-4A



$\delta^{18}\text{O}$

Febrero 2019

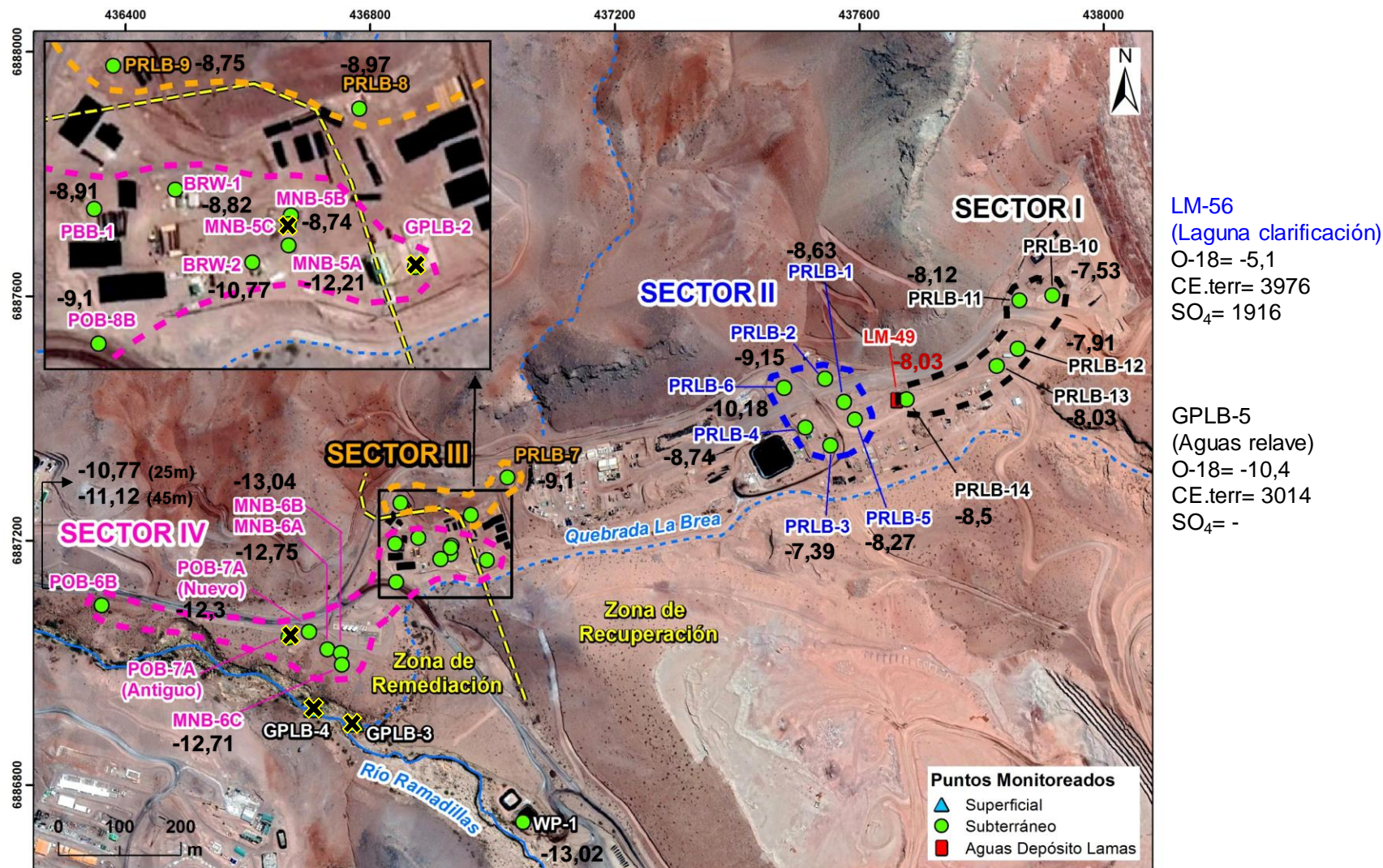


Figura N°4.2: Distribución del isótopo Oxígeno-18 en las aguas subterráneas aguas abajo del Depósito La Brea (Febrero 2019).

De acuerdo con las mediciones de isótopos estables, se observa que en Febrero 2019 el porcentaje de agua natural presente en las aguas del sistema acuífero es:

$$\% \text{ agua natural muestra} = \frac{C_{\text{end-member "agua proceso"}} - C_{\text{Muestra}}}{C_{\text{end-member "agua proceso"}} - C_{\text{end-member "agua natural_i"}}$$

Donde,

- O-18_{end-member "natural_i"} : Valor de $\delta^{18}\text{O}$ del agua representativa agua natural (‰ VSmow)
- O-18_{end-member "agua proceso"} : Valor de $\delta^{18}\text{O}$ del agua representativa del agua de proceso (‰ VSmow)
- O-18_{Muestra} : Corresponde a la composición de $\delta^{18}\text{O}$ en la muestra GP a evaluar (‰ VSmow).

En la **Tabla N°4.1** y en la **Figura N°4.3** se muestra el cálculo del porcentaje de agua natural presente en los pozos de la Zona de Recuperación (naranja) y de la Zona de Remedación (verde) para la campaña de Feb-2019.

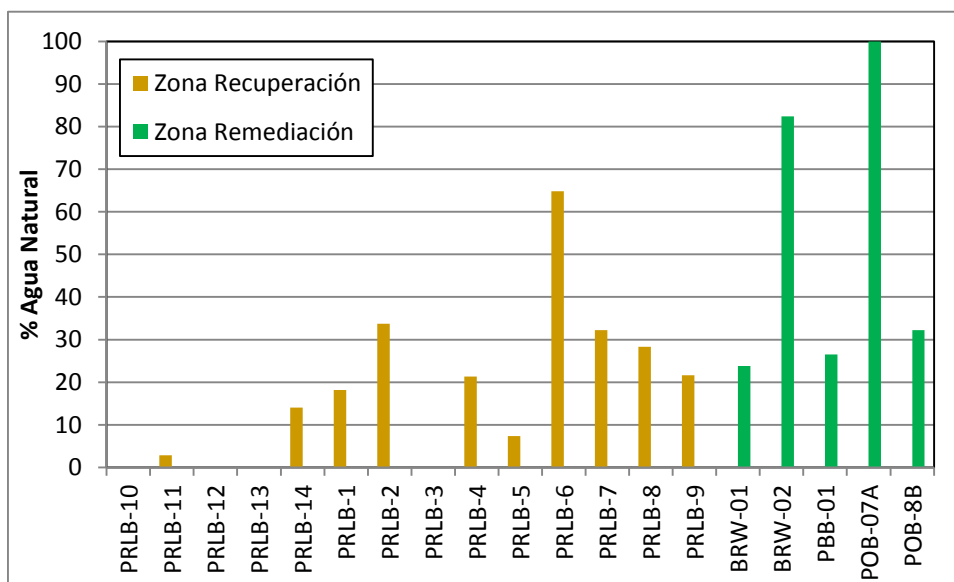


Figura N°4.3: Porcentaje de agua natural en Zonas de Recuperación y de Remedación, calculado utilizando $\delta^{18}\text{O}$.

Tabla N°4.1: Porcentajes de agua natural (no afectada por el depósito) presente en los pozos monitoreados en Febrero 2019, utilizando isótopos del agua.

Pozos	% agua natural
PRLB-10	0
PRLB-11	3
PRLB-12	0
PRLB-13	0
PRLB-14	14
PRLB-1	18
PRLB-2	34
PRLB-3	0
PRLB-4	21
PRLB-5	7
PRLB-6	65
PRLB-7	32
PRLB-8	28
PRLB-9	22
BRW-01	24
BRW-02	82
PBB-01	27
POB-07A	100
POB-8B	32

5. CONCLUSIONES

Los isótopos del agua, Oxígeno-18 y Deuterio, permiten diferenciar las aguas naturales de la cuenca de las aguas del depósito de lamas. Las aguas naturales tienen una composición isotópica muy cercana a la Línea Meteórica Mundial; corresponden a aguas subterráneas de la cuenca de la quebrada Roco. Las aguas de proceso muestran una marca isotópica asociada a la evaporación, fraccionándose preferentemente el Oxígeno-18 por sobre el Deuterio.

Las aguas subterráneas del sistema acuífero de la quebrada La Brea aguas abajo del depósito de lamas, se alinean en una línea de mezcla entre las aguas naturales y las aguas de proceso provenientes del depósito de lamas.

Con las mediciones efectuadas en Febrero 2019 se ha evaluado la participación de las aguas de proceso en el sistema natural, utilizando como marcas diferenciadoras las mediciones de los isótopos ambientales estables del agua (Oxígeno-18 y Deuterio).

En la Zona de Recuperación se evalúa que el porcentaje de aguas naturales en las aguas subterráneas de este sector acuífero, está comprendido entre 0% y 65%.

En la Zona de Remediación, el porcentaje de aguas naturales en las aguas subterráneas es, en promedio, de un **53%** (entre 24% y 100%, dependiendo de la ubicación del pozo).

GP

Julio 2019