



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**ANÁLISIS Y CONCEPTUALIZACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA DE  
CALAMA Y SUBCUENCA LLALQUI, II REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**IGNACIO CHRISTIAN BULBOA FORONDA**

**PROFESOR GUÍA:  
DIRK RÜTTGER**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
KATJA DECKART  
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2017**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo  
**POR:** Ignacio Bulboa Foronda  
**FECHA:** 08/09/2017  
**PROFESOR GUÍA:** Dirk Rüttger

## **ANÁLISIS Y CONCEPTUALIZACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA DE CALAMA Y SUBCUENCA LLALQUI, II REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE**

La cuenca de Calama se encuentra ubicada en la II región de Chile, Antofagasta, la cual consiste en una depresión situada entre la precordillera y la cordillera principal. La zona de estudio corresponde a una subcuenca de esta, la cuenca de Pampa Llalqui, ubicada aproximadamente a unos 30 km al oeste de Calama, se extiende entre las coordenadas 518870.5 y 571035.4 latitud Este y 7473852 y 7531677 longitud Norte.

Las condiciones de extrema aridez y escasez de recursos hídricos en la región es una situación que se ha incrementado en los últimos años. Según la DGA la cuenca de Calama ha sido declarada agotada de estos, limitándose así el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos.

Dado este contexto, la presente memoria consiste en el estudio y conceptualización de los acuíferos de Pampa Llalqui, con el fin de conocer en detalle las fuentes de recarga del acuífero inferior y demostrar que el resto de la cuenca no sufre una recarga directa de este sistema, sino que una influencia producto de la descarga de los acuíferos de Pampa Llalqui en el resto de la cuenca de Calama. De acuerdo a esta hipótesis existiría una desconexión hidráulica que permitiría una extracción del recurso hídrico en el acuífero inferior sin causar una sobre-explotación de este.

De acuerdo con la información de análisis químicos, registro de niveles de agua recopilado de diversas redes de pozos (Minera Centinela, Aguas de la Sierra y División Ministro Hales) y los antecedentes geológicos disponibles, se realizó una caracterización hidrológica de los distintos flujos que abastecen a la subcuenca de Pampa Llalqui y el resto de la Cuenca de Calama.

Como resultados de la caracterización de los distintos flujos se definieron 3, donde su dirección, y caracterización hidrogeológica dependerá de controles estructurales, profundidad del flujo y ubicación geográfica:

- El flujo 1 se caracteriza provenir desde noreste desde las partes altas de la cuenca e influenciar principalmente el acuífero superior e inferior de la red de pozos de monitoreo de División Ministro Hales y Minera Centinela.
- El flujo 2 proviene desde el noreste y se asocia al flujo regional del Tatio. Se observa una fuerte influencia de este flujo sobre el acuífero inferior en Pampa Llalqui.
- El flujo 3 resulta de la mezcla de los 2 flujos presentados previamente, influenciando al acuífero superior en los sectores de Pampa Llalqui, Minera Centinela y División Ministro Hales.

La concentración de elementos mayores y menores, STD y razones de isótopos en las distintas muestras permite identificar la participación de los distintos flujos y así reconocer qué flujos abastecen al acuífero en dicha zona.

Concluyendo, los resultados aportados por esta conceptualización y caracterización son relevantes debido a que permiten identificar que el flujo que abastece al acuífero inferior en Pampa Llalqui es distinto a los que abastecen al acuífero inferior del resto de la cuenca. Lo que confirmaría la desconexión hidráulica que existe ente el acuífero inferior de Pampa Llalqui y el resto de la cuenca de Calama.

## **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado a:

Mis padres por su infinito amor, esfuerzo y dedicación en mi crianza y por sobre todo en mi enseñanza ya que sin su apoyo jamás habría alcanzado mis metas y no sería la persona que soy hoy. Los amo.

A mis hermanas que fueron y son un pilar fundamental en mi vida, por las infinitas risas que me dieron y por sobre todo apoyo incondicional.

A mi abuelo caco por su amor y preocupación.

A mis abuelas Omi y Mima, que siempre estuvieron a mi lado, pero no pudieron acompañarme hasta el final de este camino, aun así, siempre estarán en mi corazón.

A mis compañeros de vida, universidad, colegio, preuniversitario y Rexini, que siempre me apoyaron y estuvieron ahí cuando los necesitaba.

Gracias por formar parte de mi vida

Ignacio Bulboa Foronda

## **Agradecimientos**

Agradezco en primer lugar a mi profesor guía, Dirk Rüttger, por su consideración, apoyo y orientación en el desarrollo de mi memoria, que resultaron en muchas horas de corrección por su parte.

A los profesores Katja Deckart y Brian Townley por su ayuda y orientación en el desarrollo y corrección de este estudio.

Finalmente, a mi hermosa familia y amigos por su infinito apoyo y comprensión en cada etapa de mi vida académica, que a momentos me mantuvo lejos de ellos. Gracias por estar siempre a mi lado.

A todo el departamento de geología: cocineros, profesores, secretarias, tías del aseo y encargados de laboratorio. Gracias por hacer la facultad de geología un lugar del cual me siento parte.

# Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Formulación del estudio propuesto.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Metodología.....	3
Capítulo 2: Antecedentes del Área de Estudio.....	5
2.1 Ubicación y vías de acceso.....	5
2.2 Clima.....	5
2.3 Flora y Fauna.....	5
2.4 Marco Geológico.....	6
2.5 Geología Local.....	10
2.6 Estructuras locales.....	13
Capítulo 3: Marco Hidrogeológico.....	15
3.1 Descripción de unidades hidrogeológicas sector medio del río Loa.....	15
3.2 Parámetros hidráulicos sector medio del río Loa.....	17
3.3 Descripción de unidades hidrogeológicas sector Pampa Llalqui.....	17
3.3 Geometría de los acuíferos en Pampa Llalqui.....	21
3.4 Parámetros Hidráulicos acuífero Pampa Llalqui.....	22
Capítulo 4: Marco Teórico.....	23
4.1 Isótopos en aguas subterráneas.....	23
4.3 Sólidos totales disueltos (STD).....	26
Capítulo 5: Resultados.....	27
5.1 Razones Isotópicas.....	27
5.2 Niveles piezométricos.....	37
5.3 Isopiezas acuífero superior e inferior.....	38
5.4 Sólidos totales disueltos.....	40
5.5 Diagramas de Piper.....	49
Capítulo 6: Discusiones.....	55
6.1 Isótopos.....	55
6.2 Flujos por revisión de piezometría y comportamiento en la distribución de niveles.....	60
6.3 Caracterización de composición isotópica de los flujos regionales.....	65
6.4 Razón isotópica según influencia de flujos.....	68
6.5 Sólidos totales disueltos (STD).....	84
6.6 Clasificación hidroquímica.....	94

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones .....	100
7.1 Conclusiones .....	100
7.2 Recomendaciones .....	103
Bibliografía.....	104
Anexos .....	107
Anexo A: Tablas .....	107
Anexo B: Mapas y figuras .....	122

# Índice de figuras

Figura 1.1: Detalle de la zona de estudio, 30 km al oeste de Calama, Pampa Llalqui, II región de Chile, Antofagasta.....	1
Figura 2.1: Contexto geológico de la cuenca de Calama (modificada Blanco, 2008).....	6
Figura 2.2: Esquema de la evolución tectono-sedimentaria de la cuenca de Calama (modificada Blanco, 2008).....	7
Figura 2.3: Cuadro cronoestratigráfico de las unidades terciarias que rellenan la cuenca de Calama (modificado de Blanco,2008).....	9
Figura 2.4: Cuadro estratigráfico conceptual de la cuenca en Pampa Llalqui (Vai, 2013).....	10
Figura 2.5: Representación de las principales estructuras dentro de la cuenca de Calama (Jordan, 2015).....	14
Figura 3.1: Representación estratigráfica de la cuenca y sus distintas unidades acuíferas. (DGA,2012).....	15
Figura 3.2: Ubicación geográfica de sondajes Pampa Llalqui utilizados para definir geometría del acuífero.....	21
Figura 4.1: Línea meteórica mundial comparada con los cambios de composición isotópica del agua producto de diferentes procesos (Domenico y Schwartz, 1998).....	25
Figura 5.1: Mapa ubicación geográfica de muestras ADLS en las cuales se realizaron análisis de isotopía.....	27
Figura 5.2: Gráfico $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ ,razón isotópica muestras sector Pampa Llalqui.....	28
Figura 5.3: Mapa de ubicación geográfica de muestras de agua con información isotópica sector MC.....	30
Figura 5.4: Gráfico $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ ,muestras red de pozos Minera Centinela.....	31
Figura 5.5: Mapa de ubicación geográfica de muestras con análisis isotópico DMH.....	33
Figura 5.6: Gráfico $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ , razón isotópica muestras red de pozos DMH, gráfico en plana completa y leyenda en anexo B.....	34
Figura 5.7: Pozos pertenecientes al acuífero superior e inferior con registro de niveles estáticos correspondiente a las 3 zonas de estudio.....	37
Figura 5.8: Mapa de curvas piezométricas generadas a partir del Kriging del acuífero superior, con una resolución de 10 metros.....	39
Figura 5.9: Mapa de curvas piezométricas generadas a partir del Kriging del acuífero inferior, con una resolución de 10 metros.....	39
Figura 5.10: Mapa ubicación geográfica muestras con análisis químico de STD realizado por ADLS.....	40
Figura 5.11: Gráfico de concentración STD para aguas superficiales sector Pampa Llalqui, muestreo ADLS.....	41
Figura 5.12: Gráfico de concentración STD para muestras acuífero superior ADLS.....	41
Figura 5.13: Gráfico de concentración STD para muestras acuífero inferior ADLS.....	42
Figura 5.14: Gráfico de concentración STD Para muestras acuífero inferior zona Pampa Llalqui, muestreo realizado por Nazca.....	42
Figura 5.15:Mapa ubicación geográfica muestreo con análisis químico de STD realizado por MC.....	43
Figura 5.16: Gráfico de concentración STD para muestras de aguas superficiales sector MC...44	44
Figura 5.17: Gráfico de concentración STD en pozos habilitados en el acuífero superior sector MC.....	44

Figura 5.18: Gráfico de concentración de STD en pozos habilitados en el acuífero inferior sector MC.....	45
Figura 5.19: Mapa ubicación geográfica muestreo de STD realizado por DMH.....	46
Figura 5.20: Gráfico 1 de concentración STD red de pozos DMH.....	46
Figura 5.21: Gráfico 2 de concentración STD red de pozos DMH.....	47
Figura 5.22: Gráfico 3 de concentración STD red de pozos DMH.....	47
Figura 5.23: Gráfico 4 de concentración STD red de pozos DMH.....	47
Figura 5.24: Gráfico 5 de concentración STD red de pozos DMH.....	48
Figura 5.25: Diagrama de Piper red de pozos ADLS, muestras de agua superficial y acuífero superior.....	49
Figura 5.26: Diagrama de Piper red de pozos ADLS muestras acuífero inferior.....	50
Figura 5.27: Diagrama de Piper red de pozos MC muestras de aguas superficiales y acuífero superior.....	51
Figura 5.28: Diagrama de Piper red de pozos MC muestras acuífero inferior.....	52
Figura 5.29: Diagrama de Piper red de pozos DMH muestras de agua superficial y acuífero superior.....	53
Figura 5.30 Diagrama de Piper red de pozos DMH muestras acuífero inferior.....	54
Figura 6.1: Gráfico $\delta^{18}O$ vs $\delta^2H$ muestras análisis isotópico sector Pampa Llalqui.....	56
Figura 6.2: Gráfico $\delta^{18}O$ vs $\delta^2H$ muestras análisis isotópico red de pozos MC.....	57
Figura 6.3: Gráfico $\delta^{18}O$ vs $\delta^2H$ muestras análisis isotópico red de pozos División Ministro Hales.....	58
Figura 6.4 : Mapa de flujo según interpretación de isopiezas, obtenidas a partir de los niveles piezométricos del acuífero inferior.....	61
Figura 6.5: Mapa de flujo según interpretación de isopiezas, obtenidas a partir de los niveles piezométricos del acuífero inferior.....	62
Figura 6.6 Ubicación de muestras agua superficial usadas en caracterización isotópica de flujos 1,2 y 3.....	63
Figura 6.7: Gráfico $\delta^{18}O$ vs $\delta^2H$ de composición isotópica muestras de agua superficial asociadas a flujos regionales.....	65
Figura 6.8: Gráfico $\delta^{18}O$ vs $\delta^2H$ composición isotópica de muestras red de pozos ADLS.....	66
Figura 6.9: Flujos encargados de la recarga del Sistema de acuíferos en la cuenca del Loa medio.....	69
Figura 6.10: Conceptualización de la descarga del acuífero inferior en el superior (Vai, 2013).....	70
Figura 6.11: Gráfico $\delta^{18}O$ vs $\delta^2H$ de composición muestras red de pozos minera Centinela.....	71
Figura 6.12: Perfil dirección aproximada Este-Oeste sector Calama (modificado de Jordan,2015).....	71
Figura 6.13: Caracterización isotópica de los flujos encargados de la recarga del Sistema de acuíferos de la cuenca del Loa medio.....	73
Figura 6.14: Gráfico $\delta^{18}O$ vs $\delta^2H$ de razón isotópica muestras red de pozos DMH.....	73
Figura 6.15: Caracterización isotópica de los flujos encargados de la recarga del Sistema de acuíferos de la cuenca del Loa medio.....	74
Figura 6.16: Gráfico de $\delta^{18}O$ vs $\delta^2H$ de razón isotópica de muestras pertenecientes al acuífero inferior, para las distintas redes de pozos.....	76

Figura 6.17: Caracterización isotópica de los flujos encargados de la recarga del Sistema de acuíferos inferior en la cuenca de Calama.....	77
Figura 6.18: Gráfico de $\delta^{18}O$ vs $\delta^2H$ de razón isotópica de muestras pertenecientes al acuífero superior, para las distintas redes de pozos.....	78
Figura 6.19: Caracterización isotópica de los flujos encargados de la recarga del Sistema de acuíferos inferior en la cuenca de Calama.....	80
Figura 6.20: Ubicación muestras acuífero superior Pampa Llalqui con registro STD.....	80
Figura 6.21: Ubicación muestras acuífero inferior Pampa Llalqui con registro STD.....	82
Figura 6.22: Ubicación muestras con registro de STD red de pozos MC.....	85
Figura 6.23: Ubicación muestras con registro de STD red de pozos acuífero superior DMH.....	86
Figura 6.24: Ubicación muestras con registro de STD red de pozos acuífero inferior MC.....	88
Figura 6.25: Ubicación muestras con registro de STD red de pozos acuífero superior DMH.....	90
Figura 6.26: Mapa de zona contaminada inferida a través de las concentraciones de STD en el acuífero superior en las redes de pozos MC, DMH y ADLS .....	91
Figura 6.27: Ubicación muestras con registro de STD red de pozos acuífero inferior DMH.....	92
Figura 6.28: Diagrama de Piper red de pozos ADLS muestras de agua superficial y acuífero superior.....	94
Figura 6.29: Diagrama de Piper red de pozos ADLS muestras acuífero inferior.....	95
Figura 6.30: Diagrama de Piper red de pozos MC muestras de agua superficial y acuífero superior.....	96
Figura 6.31: Diagrama de Piper red de pozos MC muestras acuífero inferior.....	97
Figura 6.32: Diagrama de Piper red de pozos DMH muestras de agua superficial y acuífero superior.....	98
Figura 6.33: Diagrama de Piper red de pozos MC muestras acuífero inferior.....	99

## Índice de tablas

Tabla 3.1: Resumen de parámetros hidráulicos para los acuíferos sector medio del río Loa (modificada DGA, 2012).....	17
Tabla 3.2: Clasificación de aguas según cantidad de Sólidos totales disueltos (STD) basada en Schneider et al., (1996).....	22

## Índice de ecuaciones

Ecuación 4.1: Ecuación fraccionamiento isotópico.....	23
Ecuación 4.2: Recta Meteorica Mundial (Craig,1961).....	24

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Formulación del estudio propuesto

La cuenca de Calama de edad cenozoica se encuentra ubicada en la II región de Chile, Antofagasta, constituye una depresión situada entre la precordillera y la cordillera principal. La subcuenca de Llalqui (*Figura 1.1*) forma parte de esta, ubicada aproximadamente a unos 30 km al oeste de Calama, se extiende entre las coordenadas 518870.5 y 571035.4 latitud este y 7473852 y 7531677 longitud norte. La cuenca abarca un total de 975 Km<sup>2</sup> y su altura media es de 2841 metros sobre el nivel del mar (Vai, 2013).

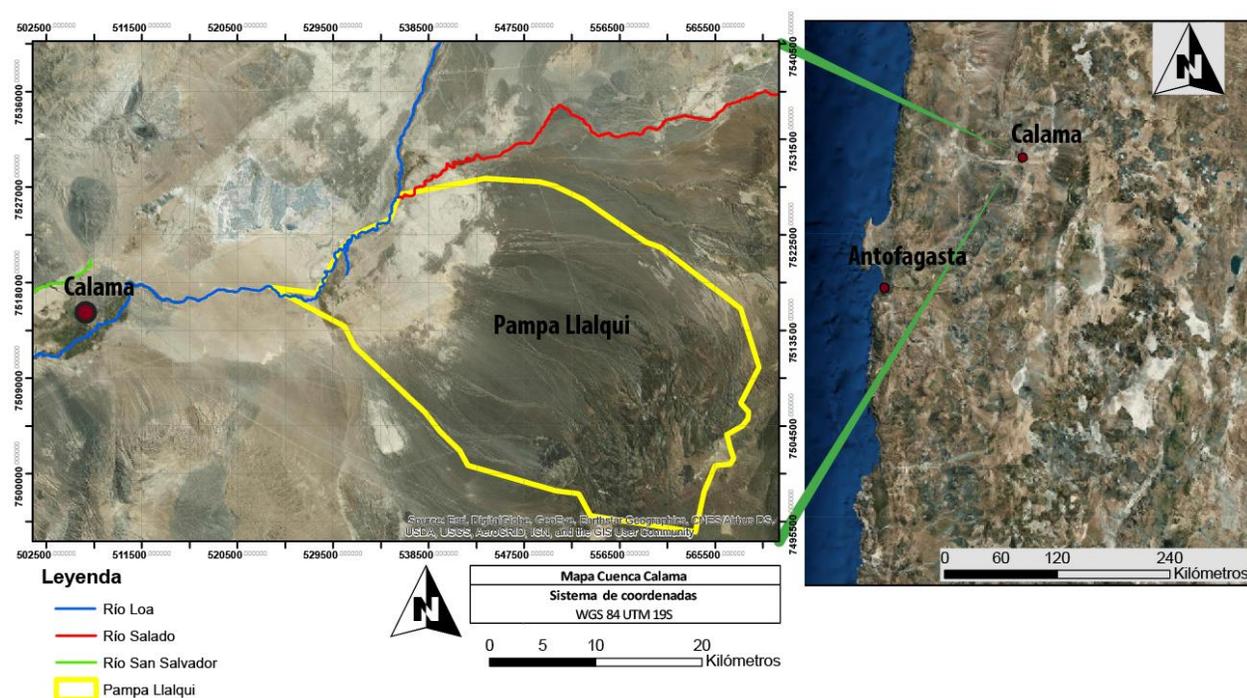


Figura 1.1: Detalle de la zona de estudio, 30 Km al oeste de Calama, Pampa Llalqui, II región de Chile, Antofagasta.

El régimen hidrológico de la cuenca del río Loa y sus afluentes es pluvial ya que sus crecidas obedecen a las intensas lluvias de verano caídas en la alta cordillera producto del “invierno altiplánico”. Las precipitaciones en esta cuenca constituyen la fuente principal de recursos hídricos renovables que ingresan al sistema, siendo escasas otras fuentes de agua, a consecuencia de las extremas condiciones climáticas predominantes en la zona (DGA, 2013).

Las condiciones de extrema aridez y escasez de recursos hídricos en la II Región de Antofagasta es una situación que se ha incrementado en los últimos años. En particular por el crecimiento de los sectores productivos, donde destaca por sobre todo la minería (DGA, 2013). El establecimiento de diversos proyectos, cercanos a la zona de estudio, ha generado un aumento en el uso y demanda de aguas del tipo subterráneas que ha llevado a la cuenca de Calama a un nivel crítico, disminuyendo considerablemente el nivel de este recurso renovable. La cuenca de Calama ha sido declarada agotada y la fuerte conexión entre el acuífero superior y recursos superficiales es preocupante (DGA, 2012).

Los acuíferos que forman la cuenca de Calama son dos: Un acuífero superior y uno inferior:

- El acuífero superior es del tipo semiconfinado, se encuentra contenido en Formación Opache, dicha formación se encuentra conformada por calizas y areniscas calcáreas.
- Por su parte el acuífero inferior, corresponde a un acuífero confinado, el cual está contenido en Formación Calama, que corresponde a sedimentos clásticos y gravas.

Además, es de suma importancia destacar que el acuífero superior e inferior no se encuentran en contacto, sino que separados por la Formación Jalquinche, que producto de su baja conductividad hidráulica esta actúa como acuitardo, provocando la desconexión hidráulica entre al acuífero superior e inferior (Minera El Tesoro, 2010).

La DGA estima que en algunos sectores específicos la desconexión hidráulica entre ambos acuíferos está debilitada, debido a la variación lateral en cuanto a espesor y litologías del acuitardo.

Frente al exceso de explotación de las unidades acuíferas, actualmente la DGA, ha aumentado la fiscalización con el fin de controlar que la explotación sea adecuada y así no romper el importante equilibrio que existe entre el río Loa y las aguas subterráneas (DGA, 2012).

En el sector de Pampa Llalqui existe una variación litológica y espacial en comparación a la cuenca de Calama, los acuífero superior e inferior, al igual que el acuitardo, están contenidos en otras formaciones, las cuales serán descritas de manera resumida a continuación:

- La unidad del acuífero superior corresponde a un acuífero libre, compuesto por litologías de calizas, depósitos detríticos con tamaños de arena fina a gravas y la presencia de algunos niveles de limos y arcillas. Estos pertenecen a las Formaciones Chiu-Chiu, Opache y parcialmente a las Formación Chiquinaputo, las que incorporan algunos niveles volcánicos entre ellos la Ignimbrita Sifón.
- El acuitardo corresponde a una unidad intermedia, conformada por depósitos detríticos finos como arcilla y limos de la Formaciones Jalquinche y Chiquinaputo.
- El acuífero inferior está compuesto por secuencias sedimentarias clásticas de grano grueso a fino de la Formación Jalquinche y de la Formación Yeso, en la cual abunda la presencia de minerales evaporíticos, también es posible encontrar brechas y conglomerados volcano-sedimentarios pertenecientes a la Formación Yalqui.

Investigaciones recientes concluyen que las fuentes de recarga del acuífero inferior en la zona de Pampa Llalqui son diferentes a las fuentes de recarga de acuíferos en la cuenca de Calama además de existir una posible desconexión hidráulica entre ellos, lo que indicaría que la extracción del recurso en el acuífero inferior no causaría una sobre-explotación de este (Nazca, 2012).

Este trabajo propone un estudio detallado de la zona de Pampa Llalqui, con el fin de conocer en detalle la influencia e interacción entre acuíferos cercanos a esta zona y determinar una posible desconexión entre estos.

## **1.2 Objetivos**

### **Objetivo General**

Construir un modelo de flujo conceptual del sistema de aguas subterráneas en Pampa Llalqui y la cuenca de Calama, que recoja e integre información geológica, niveles estáticos, hidrogeológica e hidroquímica actualizada de la zona, con el fin de evaluar la desconexión hidráulica entre éste y los acuíferos que conforman la cuenca de Calama.

### **Objetivo específicos**

1. Desarrollo de una base de datos que integre la mayor información posible dentro de la cuenca de Calama, enfocándose en aunar ubicación e información con respecto a los distintos pozos habilitados en la cuenca y parámetros que estos miden.
2. Definir y establecer dirección de flujos de las aguas subterráneas en Pampa Llalqui y resto de la cuenca y caracterizarlos químicamente.
3. Distinguir distintas fuentes de recarga y descarga de los acuíferos superior e inferior en Llalqui y en cuenca de Calama según información geológica, datos de análisis isotópico, químico e interpretación de flujos.

## **1.3 Hipótesis**

Pampa Llalqui reúne características geológicas e hidrogeológicas que sugieren que las fuentes de recarga de los acuíferos inferior Llalqui y el resto de la cuenca de Calama serían diferentes y no estarían conectadas. Esta hipótesis se apoya en:

1. Variación estratigráfica de Pampa Llalqui en comparación a la cuenca del Loa medio, el denominado acuífero de Calama.
2. Las distintas razones isotópicas.
3. Calidad de aguas incongruentes.
4. Control de flujo de aguas por componentes estructurales.

## **1.4 Metodología**

1) Desarrollo de una base de datos que integre la mayor información posible dentro de la cuenca de Calama, enfocándose en aunar ubicación e información con respecto a los distintos pozos habilitados en la cuenca y parámetros que estos miden.

- Desarrollo de modelo conceptual en la zona utilizando información recopilada en una base de datos que integre la información antigua de la cuenca de Calama y los acuíferos presentes en Pampa Llalqui, con datos obtenidos desde empresas privadas y también administrados por ADLS (Aguas de la Sierra), dueño de derechos de agua en el sector de Pampa Llalqui.
- Delimitación de la cuenca de Pampa Llalqui y las distintas redes de pozos a través del análisis de imágenes satelitales.
- Caracterización y evaluación hidrogeológica en base a la descripción de las unidades hidrogeológicas principales y al cálculo de las propiedades hidráulicas en Pampa Llalqui.

2). Definir y establecer dirección de flujos de las aguas subterráneas en Pampa Llalqui y resto de la cuenca y caracterizarlos químicamente.

- Interpolación de niveles piezométricos del acuífero inferior para el desarrollo de isopiezas.
- Reconocer las principales fallas, ubicarlas en la zona de estudio e inferir los cambios de los flujos de agua producto de estas.
- Identificar velocidades de renovación de aguas en distintas zonas según parámetros de calidad de agua.
- Caracterizar químicamente los distintos flujos encargados de abastecer a la cuenca de Calama.
- Distinguir distintas fuentes de recarga y descarga de los acuíferos superior e inferior en Llalqui y en cuenca de Calama según información geológica, datos de análisis isotópico, químico e interpretación de flujos.

3) Distinguir distintas fuentes de recarga y descarga de los acuíferos superior e inferior en Llalqui y en cuenca de Calama según información geológica, datos de análisis isotópico, químico e interpretación de flujos.

- Caracterización hidroquímica del sistema de agua subterránea, identificando la existencia de distintos acuíferos.
- Análisis estadístico de variación y evolución de razones isotópicas de Oxígeno e Hidrógeno para diferenciar distintas fuentes de recarga del acuífero.
- Establecer rangos y valores de calidad química del agua para la detección de parámetros que permitan alertar posibles recargas del acuífero inferior desde el superior y viceversa.

## **Capítulo 2: Antecedentes del Área de Estudio**

### **2.1 Ubicación y vías de acceso.**

La ruta 21 por carretera, constituye el acceso más importante a la zona de estudio, sigue en dirección noreste de forma paralela el río Loa, y une a su vez la ciudad de Calama con poblados de menores dimensiones como Chiu Chiu y Caspana. A la altura del sector de Angostura existe un camino de ripio que conecta la ruta 21 con la ruta B-165, la cual permite llegar a la Quebrada de Llalqui.

### **2.2 Clima**

Con una altura promedio de 2500 m.s.n.m., Pampa Llalqui presenta un clima desértico marginal de altura presente entre los 2000 y 3000 m.s.n.m. Este clima se caracteriza por una aridez extrema durante todo el año, la ausencia de humedad y una carencia casi absoluta de nubosidad, lo que deja la vía libre a la radiación solar durante el día y la emisión durante la noche. En consecuencia, presenta un ciclo diario con una alta oscilación térmica que rodea los 20 grados (Dirección meteorológica de Chile, 2001).

Las precipitaciones se producen en los meses de invierno de forma escasa, a diferencia de la parte alta de la región (Altiplano), en donde las precipitaciones son mayores durante los meses de marzo y diciembre producto del invierno boliviano llegando hasta los 100 mm anuales (DGA, 2003). Adicionalmente, las precipitaciones pluviales y nivales de gran magnitud se presentan de forma excepcional en la cuenca.

### **2.3 Flora y Fauna**

A pesar de que el Desierto de Atacama y sus alrededores son considerado unos de los más áridos del planeta, a partir de los 2800 metros las lluvias de origen amazónico junto con la ribera del río Loa generan condiciones favorables para el desarrollo de flora. Dentro de las especies más importante encontramos el Matorral Desértico, el Tolar Marginal, Intermedio, y de Altura; y el Pantojal Altoandino (Teillier, 2004).

Dentro de la fauna que desarrolla la cuenca del río Loa y sus alrededores se puede encontrar el Sapo espinoso, Cóndor, Chinchilla, Halcón Peregrino, Guanaco, Vicuña, y cabe mencionar que la mayoría de estas especies se encuentran en estado de vulnerabilidad o con problemas serios de conservación (CONAF, 1996, Rau et al.,1998). En la fauna acuática también se encuentran diversas especies dentro de las cuales es importante destacar Trucha Arcoíris, Trucha Café, el Pejerrey del Loa y el Pez Mosquito (DGA, 2005).

## 2.4 Marco Geológico

### 2.4.1 Geología Regional

Este capítulo tiene por objetivo reunir la mayor cantidad de información geológica posible, que exista respecto de la cuenca de Calama y Pampa Llalui, con el fin de lograr un análisis integral de la cuenca. La geología de subsuperficie es conocida a través de una gran cantidad de sondajes y campañas de geofísicas realizadas por la DGA y empresas interesadas en explotar los recursos hídricos.

El lugar donde se localiza la cuenca de Calama forma una franja más o menos alargada en sentido Norte-Sur, entre la precordillera y la cordillera principal (ver *figura 2.1*).

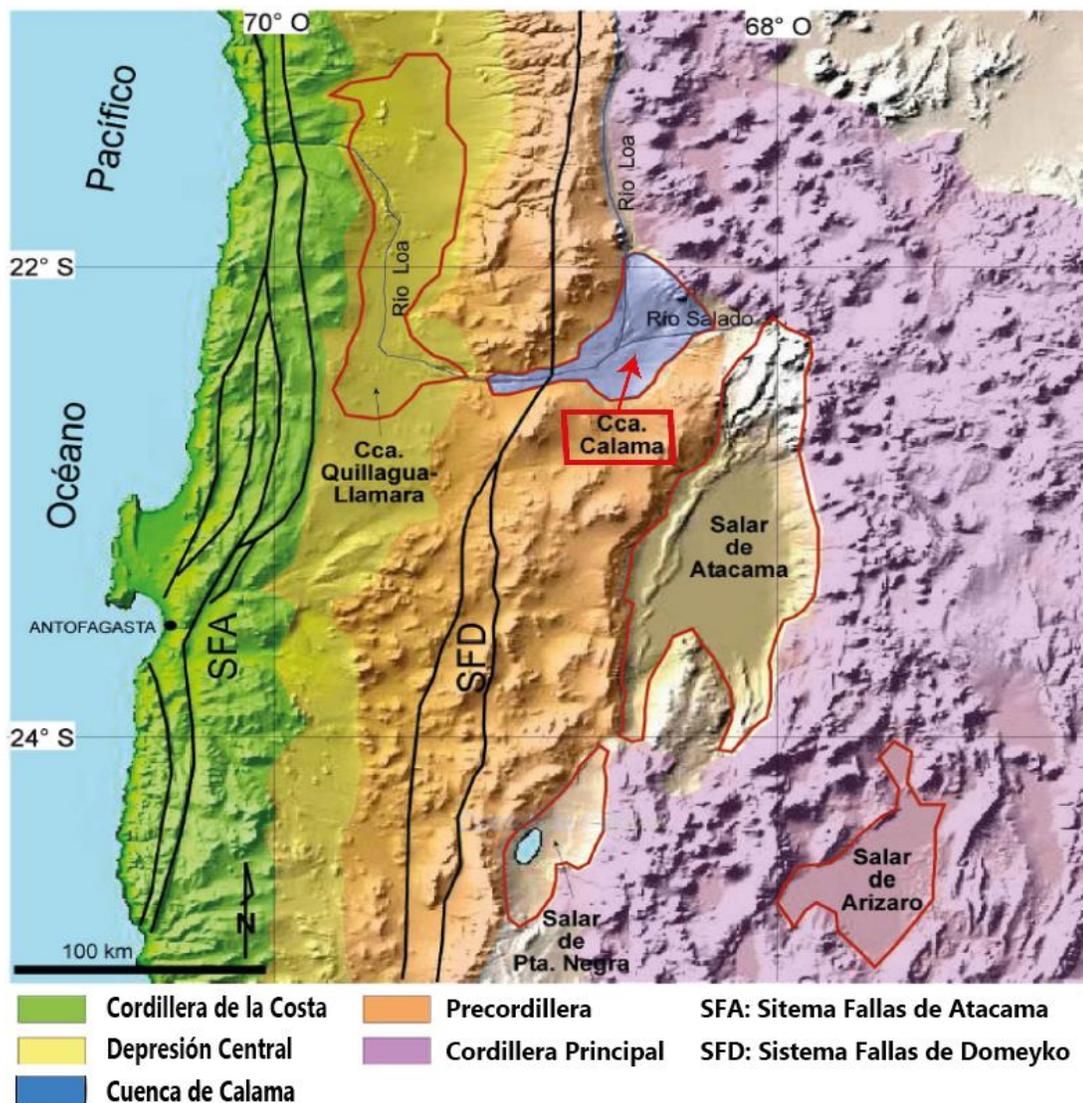


Figura 2.1: Contexto geológico de la cuenca de Calama (modificada Blanco, 2008).

La cuenca presenta características geológicas y estructurales particulares. En principio, podríamos señalar, que esta se encuentra constituida por un núcleo de rocas volcánicas y plutónicas del Carbonífero Superior-Pérmico, sobre la cual yacen secuencias marinas y

continentales mesozoicas del margen oriental de la Cuenca de Tarapacá (García, 1967). En el núcleo se emplaza el arco magmático de edad Eoceno-Oligoceno Inferior con sus centros volcánicos tanto efusivos como plutónicos, al cual se le asocian los distritos cupríferos de mayor envergadura en el mundo. Este núcleo corresponde a la continuación norte del bloque de la cordillera de Domeyko, la cual se caracteriza por presentar fallas transcurrentes de rumbo norte-sur. El sistema de falla de Domeyko es una zona de cizalla maestra que ha concentrado movimientos laterales mayores entre los bloques estructurales (Tomilson et al., 2001).

El extremo nororiental de la zona de estudio corresponde a una parte del cordón volcánico del Terciario superior-Cuaternario, constituido por estratovolcanes e ignimbritas con escasa o nula deformación tectónica, que ocupan el sector limítrofe entre Chile y Bolivia.

El relleno sedimentario de la cuenca Calama se divide en cuatro secuencias principales, compuesta por depósitos continentales (aluviales y lacustres) separados por discordancias angulares de dimensiones regionales. La primera de estas secuencias corresponde a la Formación Calama (Eoceno medio-Superior), el segundo corresponde al Grupo El Loa (Oligoceno-Plioceno) y finalmente la Formación Chiu Chiu y sus equivalentes laterales (Plioceno, Pleistoceno) (May, 2005).

## 2.4.2 Evolución Tectono-sedimentaria

Cambios en la actividad tectónica y sedimentaria de la cuenca cenozoica de Calama permite distinguir 5 estadios evolutivos que se observan en la *figura 2.2* y son descritos a continuación.

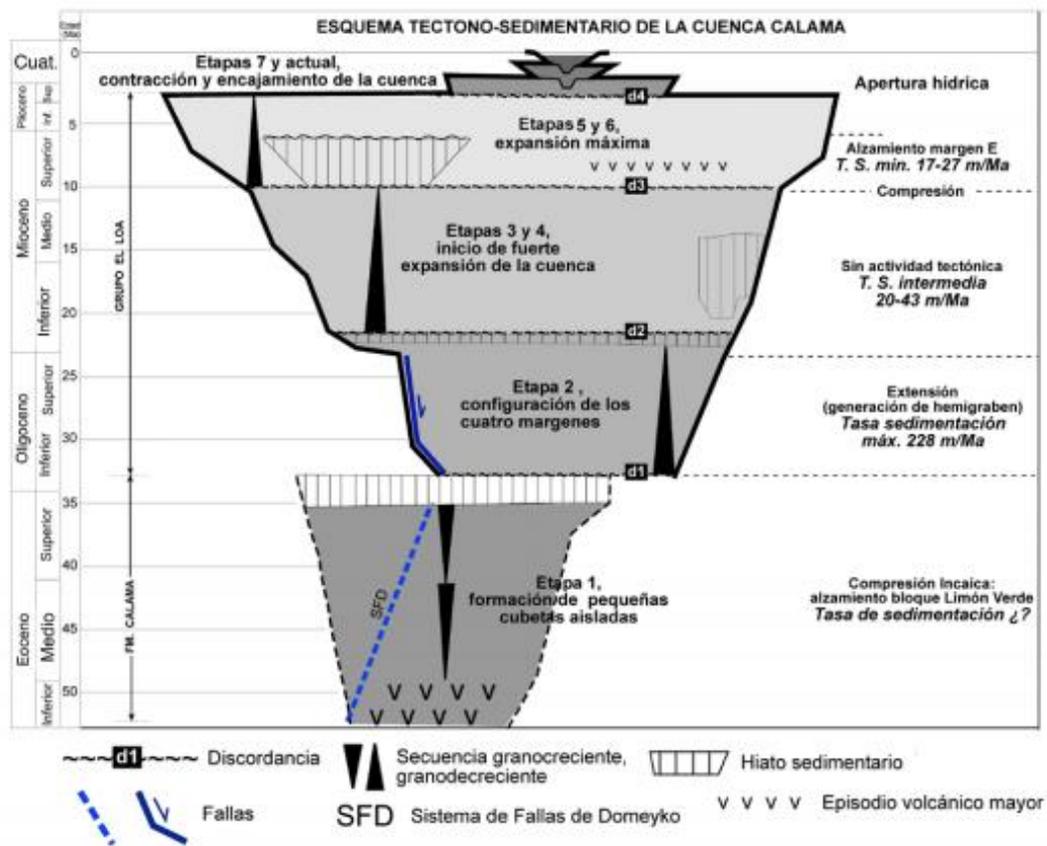


Figura 2.2: Esquema de la evolución tectono-sedimentaria de la cuenca de Calama (modificada Blanco, 2008).

El primer estadio evolutivo con el que comienza la formación de la cuenca de Calama corresponde a episodios volcánicos de carácter andesítico asociado a cuencas extensionales que ocurren en el Eoceno Inferior, seguido de una etapa de sedimentación y acumulación producto de la fuerte erosión que sufre la cordillera Incaica (Fm Calama) en el Eoceno Medio-Superior (Rochat, 2000).

El siguiente estadio evolutivo ocurre entre el Oligoceno -Mioceno Inferior donde el volcanismo se encuentra casi ausente (Blanco & Tomlinson, Carta Chiu Chiu, 2009). Además, se genera una estructura extensional o transtensional de orientaciones NNE-SSW, que corresponde a la Falla Loa. Dicha estructura forma un sistema de hemigrábenes que genera una cuenca con un depocentro de sedimentación aluvial de aproximadamente 1500 m, donde se depositan secuencias lacustres asociadas a facies evaporíticas de yeso y/o halita y que constituyen la Formación Yalqui (Panamont et al., 2004).

El tercer estadio evolutivo corresponde a un periodo de escasa actividad tectónica asociada a reactivaciones de fallas Eocenas con deformaciones de pequeña magnitud. Se inicia con la expansión de la cuenca producto de la erosión en sus bordes, luego se depositan sedimentos aluviales grano decrecientes que constituyen la Formación Lasaña. En el centro de la cuenca se desarrolla un sistema de abanico fluvial con sedimentación carbonítica y diatomítica (Fm Jalquinche) reflejando la naturaleza endorréica de la cuenca. Durante este periodo también ocurre la depositación de la Formación Yeso bajo condiciones climáticas áridas (Tomilson & Blanco, 2009).

Posteriormente, entre el Mioceno superior al Plioceno se produce la expansión máxima de la cuenca con tasas de sedimentación entre 17 a 27 m/Ma formando depósitos aluviales grano decrecientes constituyendo las Formaciones Opache y Chiquinaputo. Además, se registra un intenso volcanismo de arco localizado en la parte oriente de la cuenca, generando la Ignimbrita Sifón.

Finalmente, en el Plioceno a Pleistoceno ocurre un fuerte plegamiento en los márgenes de la cuenca, donde por una flexura monoclinal se restringe considerablemente el espacio de sedimentación, originando así secuencias aluviales Cuaternarias correspondientes a la Formación Chiu Chiu. Durante este lapso ocurre una reorganización hídrica mayor en la cuenca Calama, dando lugar a la apertura hidrológica hacia la cuenca de Quillagua, adquiriendo así un carácter exorreico que mantiene hasta el presente. Posteriormente, se produce el descenso del nivel base, el cual genera el encajonamiento de los cauces, la formación de terrazas y procesos de erosión en las unidades previas.

### **2.4.3 Margen Tectónico**

Dentro de la Cuenca de Calama ocurren 2 eventos tectónicos a escala regional, estos son de suma importancia ya que determinan la geometría de la cuenca y sus distintas Formaciones. Estos corresponden a la Fase Quechua e Incaica las cuales se pueden evidenciar por medio de discordancias angulares presentes entre las unidades. Las discordancias angulares se encuentran separando los 5 estadios evolutivos presentados anteriormente, en Pampa Llalqui solo fue posible identificar 3 (Blanco, 2008).

La primera aparece en el Oligoceno inferior y marca el comienzo de la segunda etapa, donde la cuenca adquiere una configuración de tipo hemigraben. La segunda discordancia se registra en el Mioceno inferior y corresponde al comienzo de la tercera etapa evolutiva de la cuenca. La tercera discordancia indica el comienzo del cuarto periodo evolutivo durante el Mioceno superior en el cual se produce la máxima extensión de la cuenca. Finalmente, la última discordancia queda registrada durante el Plioceno superior en la fase terminal del estadio de formación de la cuenca, en la cual se produce un fuerte plegamiento de las formaciones preexistentes y el encajonamiento de los cauces presentes en esta.

A continuación, en la *figura 2.3* presenta un cuadro cronoestratigráfico, el cual reúne a las unidades terciarias depositadas en la Cuenca de Calama y permite resumir lo expuesto anteriormente.

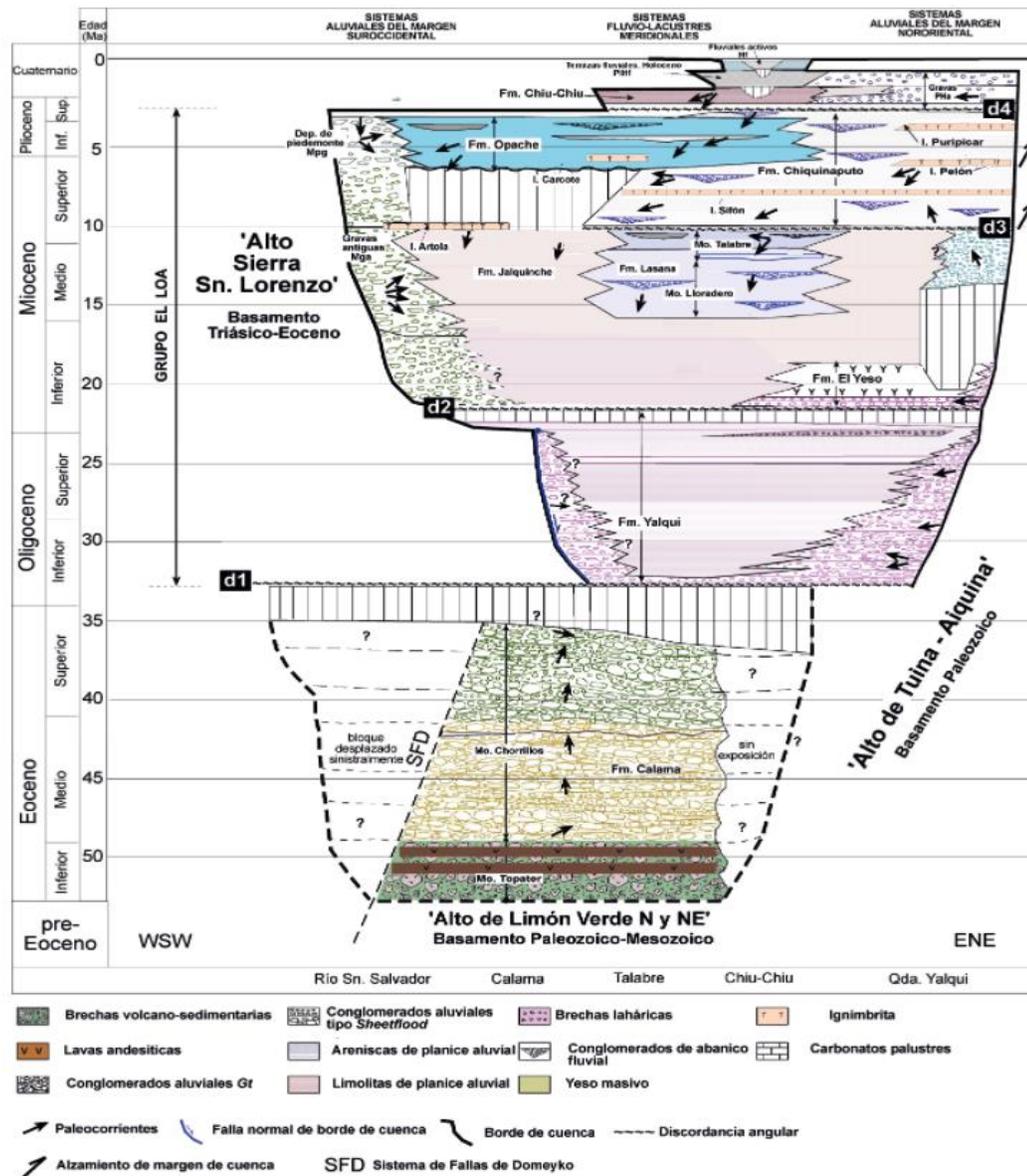


Figura 2.3: Cuadro cronoestratigráfico la Cuenca de Calama (modificado de Blanco,2008).

## 2.5 Geología Local

En la *figura 2.4*, se representa la geología local de Pampa Llalqui, la cual es caracterizada por depósitos aluviales del Pleistoceno formados por secuencias sedimentarias de limos y arcillas algo calcáreos que pertenecen a la Formación Chiu Chiu (Naranjo & Paskoff, 1981) y al Grupo Loa depositado durante el Oligoceno-Plioceno superior.

El grupo Loa corresponde a las Formaciones Opache de edad Mioceno superior-Pleistoceno superior, Chiquinaputo depositada durante el Mioceno superior-Pleistoceno superior, Jalquinche Mioceno- Mioceno superior, Yeso de edad Miocena inferior y Yalqui Oligoceno inferior-Mioceno inferior.

A continuación, se presenta un resumen y descripción en detalle de las diferentes formaciones presentes en Pampa Llalqui, basadas en estudios anteriores y complementadas a partir de descripción de sondajes. Las perforaciones fueron realizadas entre el 2008 y 2012 por Nazca y ADLS (Vai Groundwater Solutions, 2013).

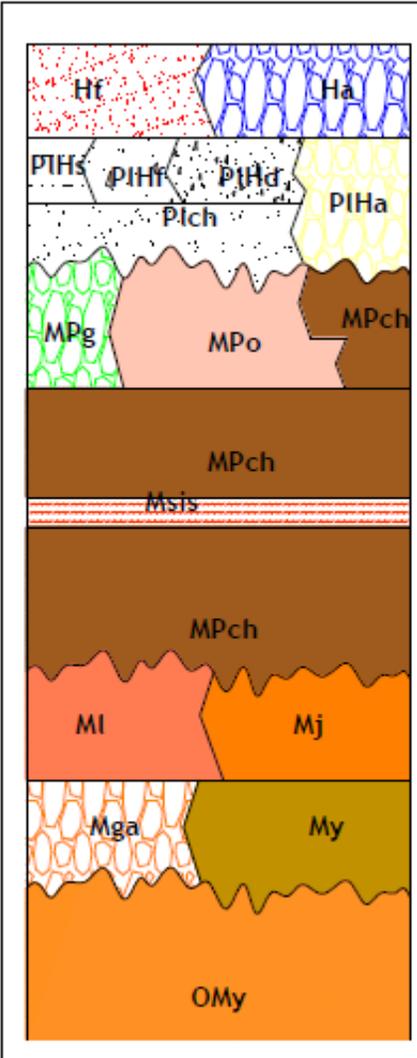
	Unidad Geológica
	Ha Depósitos aluviales activos (Holoceno Sup)
	Hf Depósitos fluviales y de ciénagas activos (Holoceno Sup)
	PIHd Depósitos de deslizamiento (Pleistoceno - Holoceno)
	PIHf Depósitos fluviales y de ciénagas antiguos (Pleistoceno Sup - Holoceno Sup)
	PIHs Depósitos salinos (Pleistoceno - Holoceno)
	PIHa Depósitos aluviales antiguos (Pleistoceno - Holoceno Medio)
	Pich Formación Chiu Chiu (Pleistoceno)
	Mpo Formación Opache (Mioceno Sup- Plioceno Sup)
	MPg Depósitos de piedemonte (Mioceno Sup- Plioceno Sup)
	MPch Formación Chiquinaputo (Mioceno Sup- Plioceno Sup)
	Msis Ignimbria Sifon (Mioceno Sup)
	MI Formación Lasana (Mioceno Med- Mioceno Sup)
	Mj Formación Jalquinche (Mioceno Med- Mioceno Sup)
	Mga Gravas aluviales antiguas (Mioceno Inf- Mioceno Sup)
	My Formación Yeso ((Mioceno Inf)
	OMy Formación Yalqui (Oligoceno Inf - Mioceno Inf)

Figura 2.4: Cuadro estratigráfico conceptual de la cuenca en Pampa Llalqui (Vai, 2013).

- Depósitos aluviales activos, Ha  
Sedimentos no consolidados, compuestos por gravas, ripios, arenas y limos. Se observan en quebradas y depósitos de playa aluvial.
- Depósitos fluviales y de ciénagas activos, Hf  
En el área de estudio se observan depósitos de ciénagas al sur del sector de Angostura, estos corresponden principalmente a llanuras y terrazas fluviales compuestas por gravas, arenas, limos, arcillas, alfombras orgánicas, diatomitas y sínteres calcáreos.
- Depósitos Salinos, PIHs  
Corresponden a los depósitos de los salares de Brinckerhoff y Rudolph, a las Salinas de agua Verde, ambos ubicados en el sector oeste del área de estudio en las inmediaciones del río Loa, estos están compuestos por limos, arcillas, yeso y halita.
- Depósitos aluviales antiguos, PIHa  
Corresponden a gravas polimícticas, arenas y limos no consolidados, que constituyen abanicos aluviales que disecan piedemontes antiguos (MPg) y son cortados por drenajes aluviales activos, donde se reconocen depósitos de playa aluvial y costras salinas. En el área de estudio se distribuyen en el sector este.
- Formación Chiu Chiu, Plch  
Esta secuencia sedimentaria se constituye de material clástico y carbonático subordinado, compuesto por gravas gruesas y finas, arenas calcáreas, diatomitas, vulcanitas, margas, calizas palustres y travertinos. La Formación se presenta en el sector oeste del área de estudio, restringida al eje del río Loa, sus potencias conocidas varían entre los 8 y 30 metros, disminuyendo a medida que se aleja del río Loa, acuñaéndose en ambos sentidos. La secuencia sobreyace en discordancia angular a la Formación Opache.
- Formación Opache, MPo  
La Formación Opache se distribuye en casi toda la cuenca Pampa Llalqui, acuñaéndose en dirección Este y Sur-este. La secuencia se encuentra compuesta por rocas clásticas y en menor medida de rocas carbonáticas, caracterizadas por calizas de color blanco a gris con intercalaciones de arenisca, limolita y ocasionalmente vulcanitas. La arenisca es calcárea de grano fino a medio, color pardo, compuesta por cuarzo, feldespatos y otros minerales máficos. También encontramos intercaladas areniscas arcillosas de color gris a marrón compuestas principalmente por clastos de cuarzo y líticos de color negro. Igualmente encontramos gravas polimícticas de color rojo a gris oscuro con caliza y calcarenita color beige. Esta Formación sobreyace de forma concordante a la Formación Chiquinaputo e Ignimbrita Sifón y, de acuerdo a la interpretación de Nazca, es la principal Formación del acuífero superior.
- Formación Chiquinaputo, MPch  
Esta secuencia sedimentaria clástica consiste en conglomerados finos a medios, de color gris oscuro que se alternan con areniscas finas a medias de color gris a pardo, y con limolitas rosadas. Además, se presentan tobos, tufitas, y de forma subordinada, diatomitas, y travertinos (Blanco y Tomlinson, 2009).

Se distinguen tres miembros dentro de la formación, cuyas características se describe a continuación, intercalada entre los miembros uno y dos se encuentra la Ignimbrita Sifón:

- **Miembro uno:** Unidad conformada por conglomerados, areniscas, limolitas rosadas, toba ignimbrítica blanca y tufitas grises, con las ultimas subyaciendo directa y concordantemente a la Ignimbrita Sifón.
- **Miembro dos:** Depositado concordantemente sobre de la Ignimbrita Sifón, conformado por conglomerados gris oscuro, areniscas gruesas, limolitas rosadas, y localmente, diatomitas cementadas en parte por carbonatos.
- **Miembro tres:** Consiste en conglomerados gris oscuro con clastos de material volcánico, con intercalaciones subordinadas de areniscas cementadas por carbonatos. La Formación se encuentra presente en todos los pozos a excepción del noroeste y al suroeste de la cuenca, presentando espesores mínimos al sureste y espesores máximos al noreste. La Formación subyace en concordancia a la Formación Opache engranándose de forma ocasional con ella, como además esta sobreyace en discordancia angular a la Formación Jalquinche.

▪ Sifón Ignimbrita, Msis

De acuerdo a Blanco y Tomlinson, (2009), la Ignimbrita "Sifón" se presenta como una unidad de flujo dentro de la Formación Chiquinaputo. De color gris verdoso claro a rojiza compuesta por cristales y ceniza mediana fuertemente cementada, presenta hasta 40% de cristales de plagioclasas, cuarzo, biotita y anfíbol. Es posible identificarla en todos los pozos excepto en los ubicados en el oeste de la cuenca. Con espesores mínimos de 2 metros al suroeste de la cuenca hasta un máximo de 20 metros en el centro y al noreste de la cuenca.

▪ Formación Lasaña, Ml

La Formación Lasaña sobreyace a la Formación Jalquinche, ocasionalmente también la engrana lateralmente, corresponde a unidad clástica de origen fluvial y aluviopalustre, compuesta por areniscas gruesas y conglomerados. Se han definido dos miembros, Lloradero, compuesto por conglomerados, areniscas gruesas gris oscura y limolitas rosadas subordinadas; y el Miembro Talabre compuesto por conglomerados finos, areniscas tobáceas, tobas, limolitas, areniscas calcáreas y carbonatos palustres. Su potencia varía entre 12 y 64 m. Su potencia máxima se observa en el centro de la cuenca, al este del río Loa.

▪ Formación Jalquinche, Mj

La Formación Jalquinche se extiende por toda cuenca de Pampa Llalqui. La secuencia consiste de limolitas de color pardo rojizo a rosada, con intercalaciones de areniscas (y conglomerados) finos a medios de color gris a pardo y presencia ocasional de secuencias de arcilla. Ambas litologías presentan cristales de yeso. El espesor de esta unidad varía entre 30 y 180 m, la potencia máxima se observa en el sector norte y suroeste de la cuenca, acuñándose hacia el sureste y noroeste hasta su espesor mínimo. La Formación subyace en discordancia angular con la Formación Opache y Chiquinaputo, y sobreyace en concordancia con la Formación Yeso.

- Depósitos aluviales antiguos, Mga  
Los depósitos aluviales antiguos se encuentran ubicados en el sur-este de la cuenca. Bajo esta denominación se agrupan gravas de color rojizo, de tamaño medio a grueso, consolidación media, mal seleccionadas y de composición volcánica. La secuencia subyace en concordancia a la Formación Jalquinche y Yeso. Interpretaciones apuntan a que esta Formación engrana lateralmente con la Formación Yeso, además, de encontrarse sobreyaciendo en discordancia angular a la Formación Yalqui.
- Formación Yeso, My  
Esta formación fue definida por Blanco (2008), compuesta por una secuencia de yesos, limolitas, limolitas yesíferas de color pardo rojizo. Presenta intercalaciones subordinadas de areniscas, tobas, tufitas y brechas. Su espesor mínimo es de 14 metros al suroeste de la cuenca por otra parte presenta espesores máximos de hasta 186 m. Subyace de manera concordante a la Formación Jalquinche y sobreyace discordantemente a Yalqui.
- Formación Yalqui, OMy  
La Formación Yalqui está compuesta de conglomerados de color pardo rojizo a grisáceos, clasto soportada, con fragmentos de origen volcánico y yeso subordinado, en una matriz limo-arenoso. Este se alterna con niveles de grava de grano fino a grueso, y arenas de tamaño medio a grueso, ambos de color pardo rojizo y de composición polimícticas con clastos volcánicos. Se desconoce la potencia máxima de esta unidad, los espesores observados son de 40 metros al suroeste de la cuenca y de 268 metros al centro de la cuenca.

## **2.6 Estructuras locales**

En el dominio morfo estructural de la cuenca de Calama las unidades Miocénicas a Pleitocénicas se disponen en general en forma horizontal y no siempre continuas, localmente presentan zonas de deformación. Como rasgo estructural de la cuenca media del Loa, es posible apreciar tanto fallas, set de fallas, así como estructuras locales, las cuales determinan su geometría y características principales de la cuenca. Las estructuras y los sets de fallas más importante serán descritos a continuación y representados en la *figura 2.5*.

- Falla Loa  
Falla inversa con vergencia al noreste, se encuentra ubicada en la parte central del valle de Calama lugar donde se extiende hasta el norte de Talabre. Durante el Oligoceno produce un desplazamiento normal de 2000 m hacia el este, para que luego en el Mioceno Tardío ocurra un desplazamiento en el rumbo lo que genera pequeños pliegues sobre la traza de la falla. Es importante mencionar que la falla define el límite este de la Formación Yalqui, además de generar un pequeño impacto en los estratos de Mioceno por lo que probablemente tiene un impacto de menor escala en el comportamiento del acuífero (Blanco & Tomlinson, 2009) (Blanco,2008).
- Falla Cere  
Reactivación normal de una falla Paleozoica que ocurre entre el Mioceno y Plioceno, ubicada en el borde noroeste del valle de Calama. Es de suponer que genera un impacto de infiltración desde el río Loa hasta la Formación Lasaña (Tomlinson et al., 2012).

- 2.6.3 Fallas Mesozoicas y Eocenas

Estas fallas de edad mesozoica y eocena se encuentran ubicadas al oeste y al sur de la cuenca. Tendrán impactos geomorfológicos definiendo los límites de la cuenca de Calama (Mpodosis et al., 1993).

- Falla Milagro

Falla inversa con vergencia hacia el este, ubicada entre Talabre y el cerro Calama. Esta estructura ocurre en un régimen de compresión durante la fase Incaica en el Eoceno, donde produce un alzamiento de aproximadamente de 1000 m del lado norte de la cuenca (Blanco, 2008).

- Set de fallas de San Salvador-Valle Loa

Set de fallas con vergencia hacia el este, ubicadas cercanas al norte del cerro Chintoraste adyacente al cañón del río Loa. Hay evidencia de estrías horizontales que indican un desplazamiento en el rumbo de decenas de metros. La falla genera una discontinuidad física en las rocas huésped del acuífero y acuitardo, lo que produce una yuxtaposición de rocas metasedimentarias con rocas volcánicas e ígneas (Jordan et al., 2015).

- Monoclinal y sinclinal adyacente de Chiu Chiu

Estos pliegues se encuentran ubicados en el sector este del valle de Calama. Las estructuras datan de una edad aproximada de unos 3 Millones de años, de origen no tectónico. Desde el punto de vista hidrogeológico genera un cambio en la altura de las rocas huésped del acuífero superior en 100 metros (Blanco & Tomlinson, 2009).

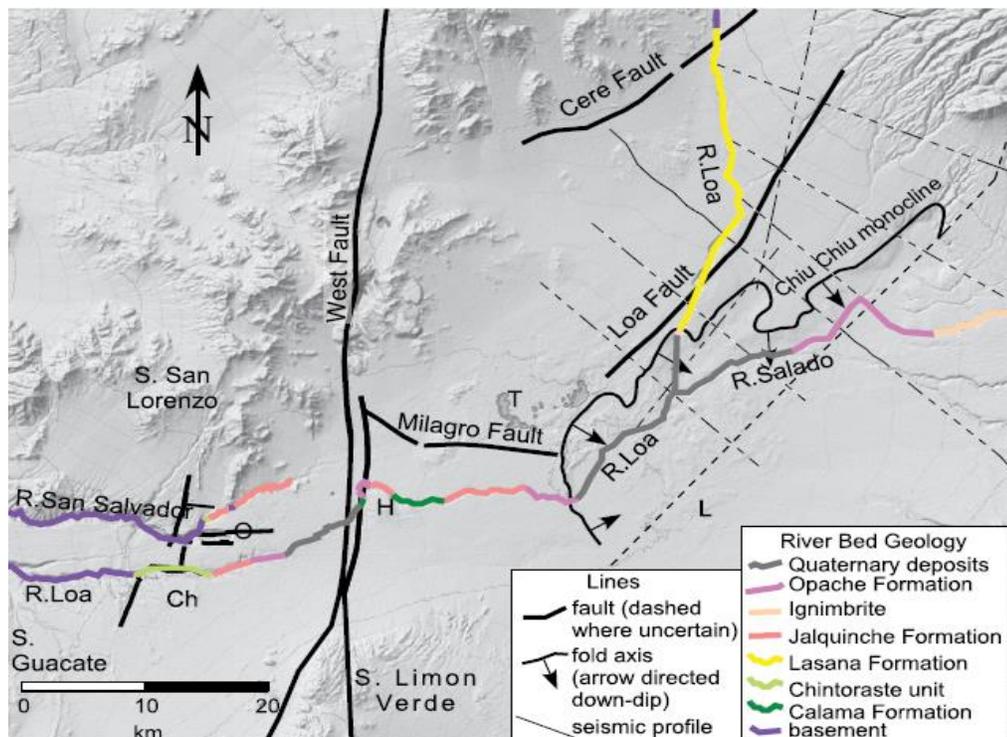


Figura 2.5: Representación de las principales estructuras dentro de la cuenca de Calama (Jordan, 2015).

## Capítulo 3: Marco Hidrogeológico

En el presente estudio se realiza la comparación entre los acuíferos presentes en el sector de Pampa Llalqui, y los presentes en la gran cuenca de Calama, en particular, en el sector del Loa medio, relacionado a la red de monitoreo de pozos DMH y MC. Se realiza una descripción desde el punto de vista hidrogeológico de las unidades subsuperficiales en ambos casos.

La caracterización del sector Pampa Llalqui es resultado una refinación del modelo publicado inicialmente por Nazca, sumado a los nuevos antecedentes aportados por campañas de perforación implementadas entre los años 2008 y 2012 por ADLS.

Por su parte la conceptualización de los acuíferos en sector medio del río Loa, se resume a partir de información recolectada por la consultora Matraz, la cual considera información de diversas fuentes como MET (antigua minera Centinela) y CODELCO (DGA, 2012).

### 3.1 Descripción de unidades hidrogeológicas sector medio del río Loa

De acuerdo con la conceptualización original realizada por consorcio Matraz, en el año 2012 indica que entre los materiales detríticos depositados en la cuenca directamente sobre el basamento metamórfico es posible identificar 3 unidades acuíferas principales. Dichas unidades acuíferas se componen en realidad de 4 subunidades hidrogeológicas. Las cuales se pueden observar parcialmente en la *figura 3.1* y son descritas a continuación:

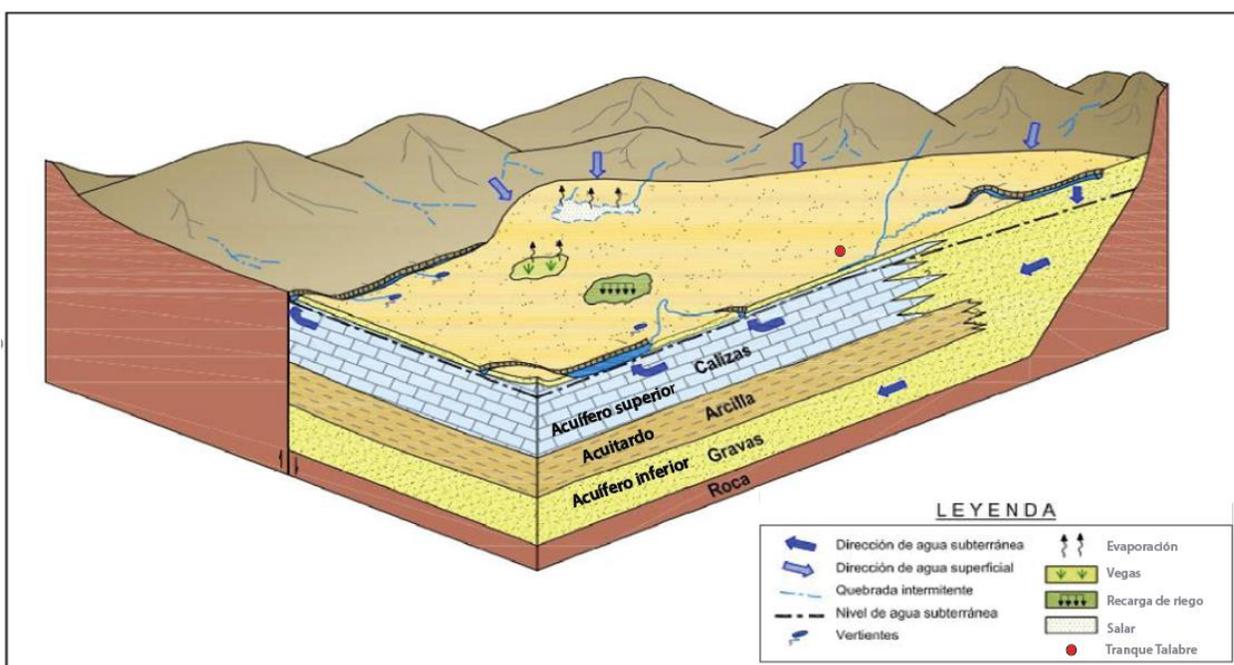


Figura 3.1: Representación estratigráfica de la cuenca y sus distintas unidades acuíferas (Modificado DGA, 2012).

### **3.1.1 Acuífero Superior kárstico-detrítico El Loa**

El acuífero superior en esta zona es conformado por diversas litologías, las cuales pueden ser divididas tres subunidades.

- La primera subunidad corresponde a rocas carbonatadas y detríticas pertenecientes principalmente a la Formación Opache y a parte superior de la Formación Jalquinche. Éstas constituyen un acuífero predominantemente libre y de permeabilidad que varía de mediana a alta con respecto a las demás subunidades.
- La segunda subunidad está conformada por depósitos finos, estos depósitos han sido interceptados durante la construcción de los pozos situados en los sectores noreste y sureste del Tranque Talabre. Además, esta subunidad se caracteriza por presentar una permeabilidad baja en relación a la primera subunidad.
- Finalmente, la tercera unidad se encuentra conformada por depósitos detríticos, los cuales presentan una importante fracción arenosa. Los depósitos de esta subunidad presentan valores de permeabilidad elevados en relación a la subunidad anterior.

En cuanto a las dimensiones de las distintas subunidades, el acuífero superior kárstico presenta una potencia entre los 30 y 130 metros. Por su parte, la segunda subunidad registra espesores de hasta 200 metros, hacia el sureste del Tranque Talabre se produce un aumento de carácter regional del espesor de la subunidad.

### **3.1.2 Acuitardo ignimbrítico**

Esta unidad se correlaciona con la ignimbritas de Artola, las cuales se disponen sobre los depósitos limo-arcillosos del acuitardo detrítico del Loa.

El acuitardo se extiende ampliamente en la zona de estudio, con una potencia variable, con valores entre 1 y 50 metros. Dependiendo de su disposición estratigráfica, su presencia puede generar condiciones de confinamiento a semiconfinamiento en el acuífero inferior.

### **3.1.3 Acuitardo detrítico El Loa**

El acuitardo detrítico es formado esencialmente por estratos limo-arcillosos, que se pueden dividir en tres subunidades gracias a sus propiedades hidráulicas. La primera subunidad corresponde a un depósito limo-arcilloso de baja permeabilidad, a su vez, la segunda subunidad está compuesta por depósitos arenosos de permeabilidad media a alta. Finalmente, la tercera subunidad se encuentra constituida por rocas volcánicas de baja permeabilidad.

Las subunidades anteriores se relacionan con las Formaciones Jalquinche, Lasana, Chiquinaputo y posiblemente a la sección inferior de la Formación Opache, también compuesta por una secuencia de limo y arcillas.

Esta unidad hidrogeológica posee una extensa presencia en la cuenca de Calama, presenta espesores que varían entre los 50 y 100 metros. Desde el punto de vista hidráulico se trata de una capa confinante con respecto al acuífero subyacente.

### 3.1.4 Acuífero Inferior de Gravas

Corresponde a una unidad hidrogeológica saturada, la cual se encuentra constituida por la Formación Calama y secundariamente por depósitos consolidados correspondientes a gravas aluviales antiguas de origen exógeno, depósitos de piedemonte y depósitos aluviales. De forma paralela también existen variaciones litológicas a lo largo de la cuenca de Calama, estos corresponden a depósitos limo-arcillosos que presentan un comportamiento hidráulico entre confinado y semiconfinado.

La potencia de este acuífero varía entre 0 y 200 metros, y localmente se han registrado hasta potencias de 300 metros.

## 3.2 Parámetros hidráulicos sector medio del río Loa

Los valores de conductividad hidráulica surgen a partir de diferentes ensayos realizados, correspondientes a 86 ensayos de bombeo, 44 ensayos de recuperación, 37 ensayos Lefranc, 23 ensayos Slug y 15 ensayos Packer. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Resumen de parámetros hidráulicos para los acuíferos sector medio del río Loa (modificada DGA, 2012).

Unidades hidrogeológicas		K min	K máx	Coefficiente de almacenamiento	Coefficiente de almacenamiento
		(m/d)	(m/d)	min	máx
Acuífero Superior	Calizas	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^1$	$1.210^{-4}$	$1.6 \times 10^{-2}$
	Depósitos limo-arcillosos	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-1}$		
	Depósitos de arenas negras	$1 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^2$		
Acuitardo	Acuitardo Ignimbrítico	-	$1 \times 10^{-6}$	-	-
	Acuitardo Detritico	-	$< 5 \times 10^{-3}$		
Acuífero Inferior	Depósitos de gravas	$5 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^2$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-1}$
	Depósitos limo-arcillosos	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-3}$		

*K* = Permeabilidad o conductividad hidráulica.

## 3.3 Descripción de unidades hidrogeológicas sector Pampa Llalqui

### 3.3.1 Antecedentes modelo de Nazca (2002)

La hidrogeología del sector está representada por la presencia de un acuífero superior somero, constituido por calizas y sedimentos clásticos de la Formación Opache. Por el contrario, existe también un acuífero profundo, emplazado en gravas de la Formación Jalquinche y Calama. Es preciso mencionar que las unidades acuíferas se encuentran separadas por depósitos detríticos finos como arcillas y limos pertenecientes a las Formaciones Chiquinaputo y a las partes altas de Jalquinche. Esta separación corresponde a la tercera unidad, el acuitardo, la cual genera un confinamiento y desconexión hidráulica entre ambos acuíferos

Respecto al modelo conceptual realizado por Nazca en el año 2002, este define las unidades acuíferas del sector Pampa Llalqui en relación a unidades litoestratigráficas definidas por diferentes autores en grupos o formaciones. Por lo que en términos generales el modelo conceptual de Nazca define 3 unidades acuíferas cuyas características principales se resumen a continuación:

- **Acuífero superior:**  
Este acuífero presenta un espesor variable, el cual se extiende desde los 0 hasta 100 metros, a su vez este se encuentra contenido en la Formación Opache. Dicha formación, se encuentra ubicada en el centro de la cuenca y su litología consiste principalmente en sedimentos tanto carbonatados como clásticos. El acuífero superior corresponde a un acuífero libre semiconfinado, localmente los sedimentos finos de la Formación Chiu Chiu, limita la conexión entre el acuífero superior y los ríos Loa y Salado.
- **Acuitardo Ignimbrita Sifón**  
Definida como una unidad impermeable que constituye la desconexión hidráulica entre los acuíferos inferior y superior en el sector central, sur y este de la cuenca.
- **Acuífero inferior**  
Esta unidad presenta un espesor que varía entre los 10 y 200 metros, se encuentra contenida en la Formaciones Jalquinche y Calama, ambas compuestas principalmente por depósitos clásticos. Por su parte, la Formación Jalquinche no es homogénea por lo que será más impermeable en la parte norte, debido a que presenta un aumento en materiales arcillosos de baja permeabilidad. El acuífero se encuentra desconectado del acuitardo por la ignimbrita Sifón y constituye entonces un acuífero confinado.

### **3.3.2 Refinación de Modelo Nazca por ADLS**

Entre 2008 y 2012 ADLS realizó campañas de terreno que tenían por objetivo instalar pozos de observación en los acuíferos superior e inferior, y la perforación de dos sondajes e instalación de pozos de bombeo. Durante las perforaciones se realizó un mapeo de los testigos colectados, se hizo ensayos de airlift y se enviaron al laboratorio 20 muestras de distintas formaciones, con el fin de obtener información sobre las permeabilidades, granulometría, coeficiente de almacenamiento, etc.

Por lo que las unidades hidrológicas del sector Pampa Llalqui fueron refinadas y detalladas principalmente a partir de los mapeos de sondajes e información adicional como registros de airlift y ensayos de laboratorio.

Las unidades hidrogeológicas reconocidas en el sector de Pampa Llalqui son las siguientes (VAI,2013):

- **Acuífero Superior**  
Esta unidad corresponde a un acuífero semiconfinado en la zona, y está representado por litologías pertenecientes a las formaciones Chiu Chiu, Chiquinaputo y Opache.

De la información recopilada del mapeo de testigos se propone que la unidad está compuesta por arenas gravosas de color gris, con alta selección y poca consolidación y areniscas calcáreas de color gris a pardo. Además, es posible encontrar intercalaciones de caliza blanca con moderada a alta frecuencia de fracturas, rellenas de arcilla color pardo.

A mayor profundidad de esta unidad se puede observar el aumento de lutitas color pardo intercaladas con arena y calizas, caracterizadas por una laminación y vetillas carbonáticas. Al seguir descendiendo se observan secuencias intercaladas de tobas color blanco a marrón claro e ignimbritas de color pardo a verdoso con presencia de biotita y cuarzo con vetillas calcificadas con una moderada a baja consolidación. El espesor de la unidad tiene un promedio de 160 metros y varía desde los 78 hasta un máximo de 304 metros, de acuerdo con los registros de niveles de agua, esta se encuentra en un rango de 8 a 94 metros bajo en nivel del suelo por lo que se estima un promedio de espesor saturado de 130 metros.

Las características hidráulicas de esta unidad están representadas por una marcada anisotropía en la distribución de permeabilidades de los depósitos calcáreos por procesos de disolución de carbonatos, producto de esto la Formación presenta el desarrollo de diversas cavidades.

Desde el punto de vista hidrogeológico, esta unidad se encuentra en conexión hidráulica con las escorrentías superficiales de los ríos Loa y Salado. Además, presenta una la calidad del agua y tendencias de niveles de agua sugieren la existencia de un cierto grado de conexión con el acuífero inferior, principalmente hacia el sector sur oeste de la cuenca.

▪ **Acuífero intermedio.**

La unidad corresponde a un acuitardo, el cual posee una litología conformada por un paquete de limos y arcillas, y presencia subordinada de niveles de yeso e ignimbrita. También en esta unidad predominan lutitas consolidadas de color pardo, con un leve contenido de biotita, con zonas de moderada a alta fracturación, intercaladas con arenas finas consolidadas, color café y polimícticas. Las arenas presentan tamaño de granos variables, caracterizados por una general baja consolidación y algunas zonas extremadamente fracturadas. A una mayor profundidad se observa un aumento de la presencia de arenas gravosas. Intercaladas se observan secuencias de lutita conglomerádica de color pardo con baja frecuencia de clastos, con moderado a alto fracturamiento.

El espesor de esta unidad varía en el rango de 32 hasta 104 metros, presentando una potencia promedio de 67 metros, cuya presencia tiende a disminuir hacia el sector central sur oeste de la cuenca, cercanos al Salar de Brinkerhoff.

Hidrogeológicamente esta unidad es una zona con bajos valores de permeabilidad y que separa hidráulicamente a ambos acuíferos y es la encargada de confinar al acuífero inferior.

De acuerdo al mapeo geológico, la potencia de esta unidad disminuye hacia el norte en el sector sur-oeste de la cuenca, lo que podría generar una conexión de carácter local en esta zona. Producto de una reducción del espesor y/o inmersión de la unidad producto del plegamiento. Además, algunos sondajes mostraron que las lutitas pueden presentar un grado de fracturamiento elevado lo que podría aumentar la permeabilidad secundaria generando conexión hidráulica entre al acuífero superior e inferior.

▪ **Acuífero inferior**

Esta unidad corresponde al acuífero explotable en el sector de Pampa Llalqui y comprende secuencias sedimentarias clásticas y sedimentos clásticos de grano fino de la Formación Jalquinche y parte de la Formación Yeso y Yalqui.

En su parte superior se observan lutitas, limos color pardo-marrón, con frecuente vetilleo carbonático y cristales de Yeso. Presenta intercalaciones de secuencias de yeso blanco, con agregados de cristales y vetillas carbonáticas, caracterizado por moderado a alto fracturamiento. A medida que aumenta la profundidad se observan secuencias de areniscas color café, principalmente de grano fino, consolidada y vetilleo carbonáticos. Luego de una zona de transición compuesta por areniscas consolidadas, color café con contenidos y laminación de minerales máficos y moderada frecuencia de fracturas, dominan los conglomerados de color café a gris, polimícticos, clasto soportados, con clastos de tamaño fino a grueso en una matriz principalmente limosa. Además, es posible observar inclusiones de yeso, presencia de sal y vetillas con yeso.

- La base de esta unidad no fue interceptada por ningún sondaje, por lo que su espesor total es estimado entre los 700 a 800 metros, de acuerdo a investigaciones geofísicas realizadas (Jordan, 2006).
- Las litologías en esta unidad van desde facies gruesas como gravas y arenas, hasta limos y arcillas lo que entrega una particular anisotropía en la distribución de permeabilidades y de propiedades hidráulicas principalmente.
- Los valores de permeabilidad estimados a partir de pruebas de bombeo entregan valores significativamente menores a los estimados por nazca en el 2002 (VAI,2013).

### 3.3 Geometría de los acuíferos en Pampa Llalqui

Gracias a la información recopilada durante la perforación y habilitación de los pozos (realizada por ADLS) junto con la información aportada por Nazca, fue posible, definir una aproximación a la geometría del acuífero, definiendo la distribución de las distintas unidades hidrogeológicas en de la cuenca Pampa Llalqui a través de la correlación litoestratigráficas de las formaciones previamente definidas. En la figura 3.2 se presenta las ubicaciones de los pozos perforados en Pampa Llalqui cuya información fue considerada para definir la geometría y límites de los acuíferos.

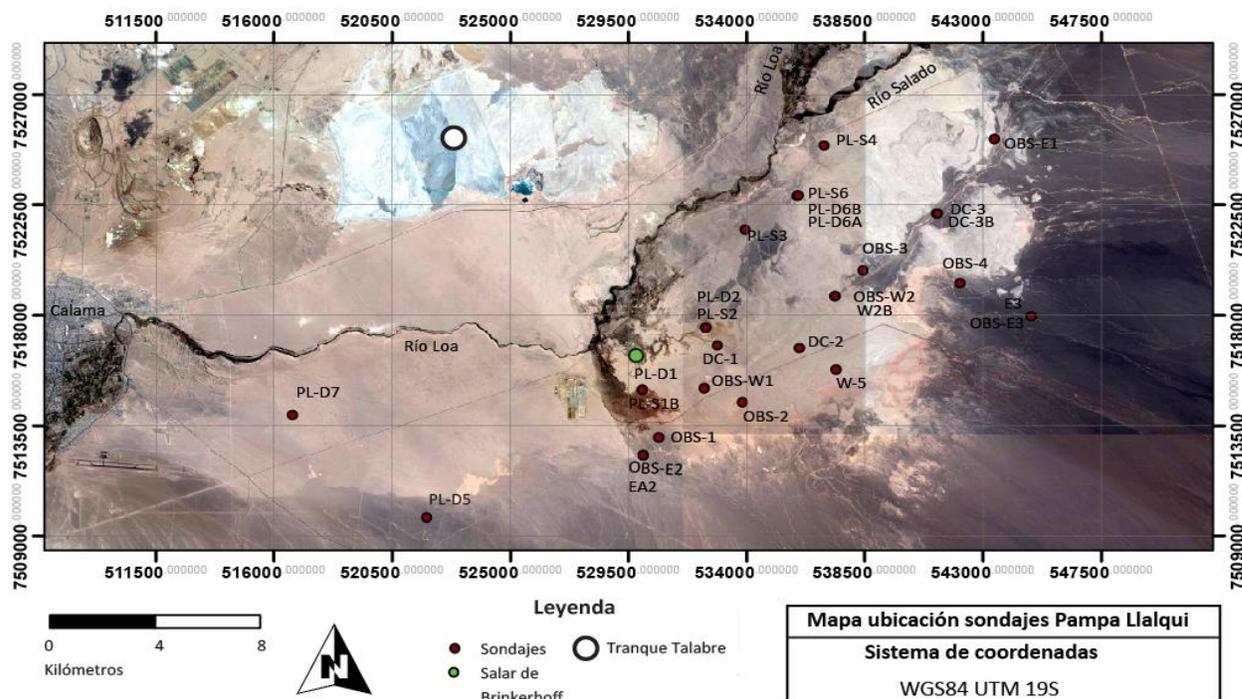


Figura 3.2: Ubicación geográfica de sondajes Pampa Llalqui utilizados para definir geometría del acuífero.

La unidad del acuífero superior fue observada en 37 sondajes. Por lo general el acuífero superior aumenta su espesor constantemente hacia el sureste de la subcuenca hasta su máxima potencia de 324.5 metros en la parte central de la cuenca, en el sondaje DC2, la potencia disminuye drásticamente hacia el oeste encontrándose la mínima de 52 metros en el sondaje PL-D7 que se encuentra en el límite del área de estudio.

El acuífero inferior fue interceptado en 19 sondajes realizados por ADLS. Las potencias observadas varían de valores entre los 44 y 312 metros; la mayor potencia es observada al este del Salar de Brinkerhoff, con potencias superiores a 200 metros. Las potencias más bajas que se observan en la parte sureste y suroeste en donde el acuífero inferior se acuña producto del alzamiento, situación que se observa en el sondaje E3, con solo 44 metros de espesor.

El acuitardo se correlaciona con los limos y arcillas de la Formación Jalquinche y Chiquinaputo además de la Ignimbrita Sifón. El acuitardo fue interceptado por 21 sondajes de exploración, los cuales muestran potencias que van entre 130 y 182 metros. La potencia máxima se observa en la parte central de la cuenca mientras que la menor se observa hacia el noreste de la cuenca en los pozos OBS-3 y OBS-E1.

### **3.4 Parámetros Hidráulicos acuífero Pampa Llalqui.**

Gracias a las pruebas de bombeo, ensayos hidráulicos implementadas por ADLS (2012) y junto a información recopilada por Nazca (2002) se pudo establecer los parámetros hidráulicos para las distintas Formaciones. (Vai Groundwater Solutions, 2013)

Las pruebas de bombeo implementadas en 11 pozos por Nazca los cuales se encuentran habilitados mayormente en el acuífero superior, de acuerdo a la profundidad de los respectivos pozos. Por otra parte, las pruebas de bombeo realizadas por ADLS (2012) fueron realizada en la Formaciones Jalquinche, Chiquinaputo y Yeso del acuífero inferior, con litologías relativamente más finas se obtuvieron valores de permeabilidad considerablemente menores.

La Tabla 3.2 muestra el resumen por acuífero de los resultados de la permeabilidades y transmisibilidad obtenidas:

*Tabla 3.2: Resumen de propiedades hidráulicas por unidad (Modificada de VAI,2016).*

<b>Unidad</b>	<b>K min (m/d)</b>	<b>K promedio (m/d)</b>	<b>K máx (m/d)</b>	<b>Coefficiente de almacenamiento</b>	<b>Potencia Saturada(m)</b>
Acuífero Superior	0.6	3.3	13	$3.3 \times 10^{-3}$	20-280
Acuitardo	0.02	0.05	0.09	-	5-180
Acuífero inferior	0.01	0.1	0.6	$6 \times 10^{-4}$	10-1400

*K=Permeabilidad o conductividad hidráulica.*

## Capítulo 4: Marco Teórico

### 4.1 Isótopos en aguas subterráneas

Los isótopos son átomos del mismo elemento que tienen el mismo número de protones y electrones, pero un número distinto de neutrones. La diferencia en el número de neutrones radica que los isótopos de un mismo elemento tienen la misma carga, pero un diferente número másico (Kendall, 1995).

A través del tiempo la composición isotópica en los sistemas terrestres cambia, producto de procesos de decaimiento radioactivo e interacciones con radiación cósmica. Los isótopos radioactivos son nucleidos que espontáneamente se desintegran a través del tiempo para formar otros isótopos. Durante la desintegración los isótopos radioactivos emiten partículas alfa, beta y rayos gamma.

En cambio, los isótopos estables son nucleido que no sufren desintegración radiactiva, por lo que su composición isotópica no varía en relación al paso del tiempo, sino que está asociada al fraccionamiento isotópico (Kendall, 1995).

El fraccionamiento isotópico se define como el fenómeno a través del cual, la composición isotópica de un compuesto determinado cambia, por medio de procesos físicos o químicos. Dichos procesos estarán determinados por las propiedades de los diferentes isótopos estables de un mismo elemento. Ya que a pesar de ser muy similares, aún así existen pequeñas diferencias en cuanto a movilidad iónica, tensión de vapor y difusividad producto de las diferencias másicas. Esto generará diferentes abundancias en la cantidad de determinados isótopos producto de los procesos químicos o físicos en componentes o fases de un mismo sistema.

El fraccionamiento isotópico puede ser representado a través del cálculo de  $\delta$  (Mook, 2000).

$$\delta \text{ (en } \text{‰}) = \left( \frac{R_x}{R_s} - 1 \right) * 1000$$

Ecuación 4.1: En la ecuación, la R significa la razón entre el isótopo pesado y el liviano de un determinado elemento, por su parte los subíndices x y s corresponden a los valores de la muestra y el standard respectivamente.

Los resultados de dicha ecuación serán adimensionales y se expresarán a través de porcentajes, los cuales, pueden ser positivos o negativos. Los valores positivos de  $\delta$  indican un enriquecimiento en el isótopo pesado, a diferencia de los valores negativos, los cuales reflejarán un empobrecimiento, todo esto en relación al standard (Clark, 1997).

Los constituyentes atómicos más importantes de la molécula de agua son los isótopos estables  $^{16}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$  al igual que  $^1\text{H}$  y  $^2\text{H}$ . Estos tienen un amplio campo de aplicación en estudios de aguas subterráneas. Puesto que, las variaciones en el contenido isotópico del agua (razones de  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  y  $^2\text{H}/^1\text{H}$ ) en el ambiente natural es un importante trazador y nos entrega una invaluable información global y presente sobre el ciclo hidrológico y del clima. La observación e interpretación de la razón dependerán de comprender procesos, principalmente cambios de fase, los que producen el fraccionamiento isotópico (Cappa, 2003).

El agua de lluvia constituye una de las principales fuentes de las aguas subterráneas y superficiales, la variación espacial y temporal de su contenido isotópico puede usarse para estudiar tanto la zona de recarga de los acuíferos, como la época y el lugar donde esta ocurre. La composición del agua de lluvia se encuentra influenciada por diversos factores:

- El efecto de la temperatura es un fuerte parámetro de control de la composición isotópica del agua de lluvia. Esta dependerá de la temperatura a la cual se evaporó el agua y aún más, la temperatura a la cual condensó la lluvia o la nieve (Sharp, 2006).
- El efecto de latitudinal ya que a medida que las nubes migran de su lugar de origen las precipitaciones se van tornando más empobrecidas en isótopos pesados.
- El efecto altitudinal, en el lado barlovento de las montañas los contenidos de  $O^{18}$  y  $H^2$  en la lluvia disminuyen al aumentar la altitud, esto se debe a que aguas arriba la lluvia procede de masas de vapor progresivamente empobrecidas isotópicamente, producto de la pérdida de isótopos pesados en lluvia precedentes.

Por otra parte, siempre se debe tener en cuenta el efecto del fraccionamiento isotópico en las aguas superficiales. Ya que estas al sufrir distintos grados de evaporación y encontrarse progresivamente más alejada de su fuente de origen, se irán enriqueciendo progresivamente en isótopos pesados.

Las variaciones de oxígeno y deuterio del agua tendrán un comportamiento covariante, ya que ambos se encuentran asociados a la misma molécula, y es por esto que al graficar la composición isotópica estas se proyectarán sobre una recta. Craig (1961) realizó un estudio a partir de muestras agua alrededor de todo el mundo, en el cual, dejó en evidencia que la dispersión de la mayor parte de los valores no era muy grande y que se ajustaban a lo largo de una recta función de:

$$\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10$$

*Ecuación 4.2: Recta Meteórica Mundial (Craig, 1961).*

La *ecuación 4.2*, más conocida como Recta Meteórica Mundial (RMM), en la actualidad distintos autores han definido nuevas rectas, muchas veces para determinadas localidades, las que llamaremos Rectas Meteóricas Regionales.

En la *figura 4.1* se muestra la línea meteórica mundial comparada con los cambios de la composición isotópica del agua producto de diferentes procesos. Siendo el estado líquido del agua en el mar uno de los pasos del ciclo hidrológico, ya que este contiene el 98 % del agua líquida presente en la superficie de la tierra, su composición promedio se ha tomado como el estándar o patrón internacional (SMOW, Standard Mean Ocean Water) para el análisis de la composición isotópica.

Para interpretar los resultados de los análisis isotópicos del agua es necesario tener parámetros de referencia, uno de ellos es la línea meteórica mundial, la otra corresponde a la línea meteórica regional del agua meteórica del espacio orográfico del área de estudio y la línea meteórica local.

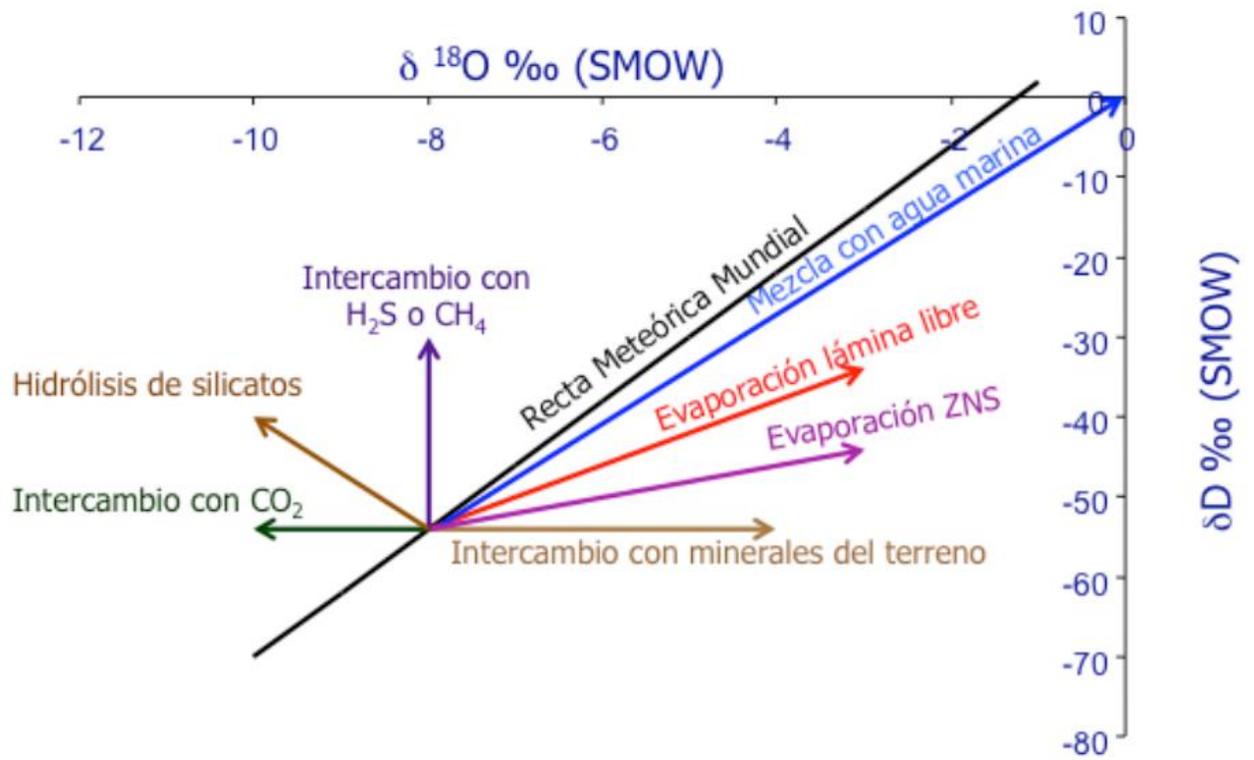


Figura 4.1: Línea meteórica mundial comparada con los cambios de composición isotópica del agua producto de diferentes procesos (basada en Domenico & Schwartz, 1998).

### **4.3 Sólidos totales disueltos (STD)**

El parámetro fisicoquímico sólidos totales disueltos o STD se puede determinar filtrando y evaporando una determinada cantidad de agua a bajas temperatura (~105 °C). Como resultado de la evaporación se obtiene un residuo seco, el cual comprende sales inorgánicas, principalmente calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, como también puede contener pequeñas cantidades de materia orgánica, la cual inicialmente se encuentra disuelta en el agua (Pérez & Restrepo 2008).

En general, la concentración de los sólidos totales disueltos indica una medición cuantitativa de la cantidad de iones disueltos, a pesar de esto, no dice la naturaleza del ion o las relaciones que estos tengan. Además, es importante destacar que el parámetro no entrega información sobre una determinada calidad de agua (Mugai, 2010).

Del total del agua de la Tierra, el agua salada en los océanos, mares y aguas subterráneas saladas representa alrededor del 97 % de la misma, solo el 2.5 a 2.75 % corresponde a agua dulce. Según lo expuesto anteriormente, el agua presente en la Tierra puede ser dividida según la cantidad de sales disueltas (Schneider et al., 1996).

*Tabla 4.1: Clasificación de aguas según cantidad de Sólidos totales disueltos (STD) basada en Schneider et al., (1996).*

Salinidad del agua basada en STD			
Agua dulce	Agua salobre	Agua salada	Salmuera
< 500 ppm	500-3000 ppm	30000 - 50000 ppm	> 50000 ppm

Las concentraciones de sales para los ríos presentan valores promedio, no obstante, es conveniente aclarar que hay una variación significativa de un cuerpo de agua dulce a otro, como resultado de diferencias en condiciones climáticas, geografía, topografía biológica y el momento seleccionado para realizar el análisis. El suelo y el desgaste o mineralización de rocas son fuentes edáficas de iones para los cuerpos de agua dulce, y eventualmente para los cuerpos salados (Gleick, 1996).

## Capítulo 5: Resultados

Los datos de niveles y análisis químicos correspondientes al sector de Pampa Llalqui fueron entregados por Aguas de La Sierra (ADLS), por otra parte, los datos e informes de División Ministro Hales (DMH) y minera Centinela (MC) fueron solicitados a través de Ley de Transparencia a la Superintendencia del Medio Ambiente y Dirección General de Aguas respectivamente.

### 5.1 Razones Isotópicas

Los resultados del análisis isotópico son representados en gráficos de  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2dH$  en donde también se grafica la línea meteórica regional correspondiente a zonas orientales del altiplano (Gonfiantini, 2001). Para los tres sectores mencionados anteriormente, se realizaron gráficos independientes, donde se definen grupos según rangos de composición isotópica.

#### 5.1.1 Grupos Aguas de La Sierra

En la *figura 5.1*, es posible observar la ubicación geográfica de los puntos correspondientes al muestreo isotópico, sector de Pampa Llalqui. Los análisis isotópicos e información fueron levantadas por las empresas minera Nazca y ADLS en el marco de estudios para adjudicación de derechos de agua (Nazca) y plan de alerta temprana por parte de ADLS. Dentro del sector de Pampa Llalqui se tomaron un total de 61 muestras en campañas realizadas entre el año 2011 al 2013 por ADLS. Dichos análisis fueron complementados por información recopilada por Nazca en años previos, donde se recopiló un total de 5 muestras.

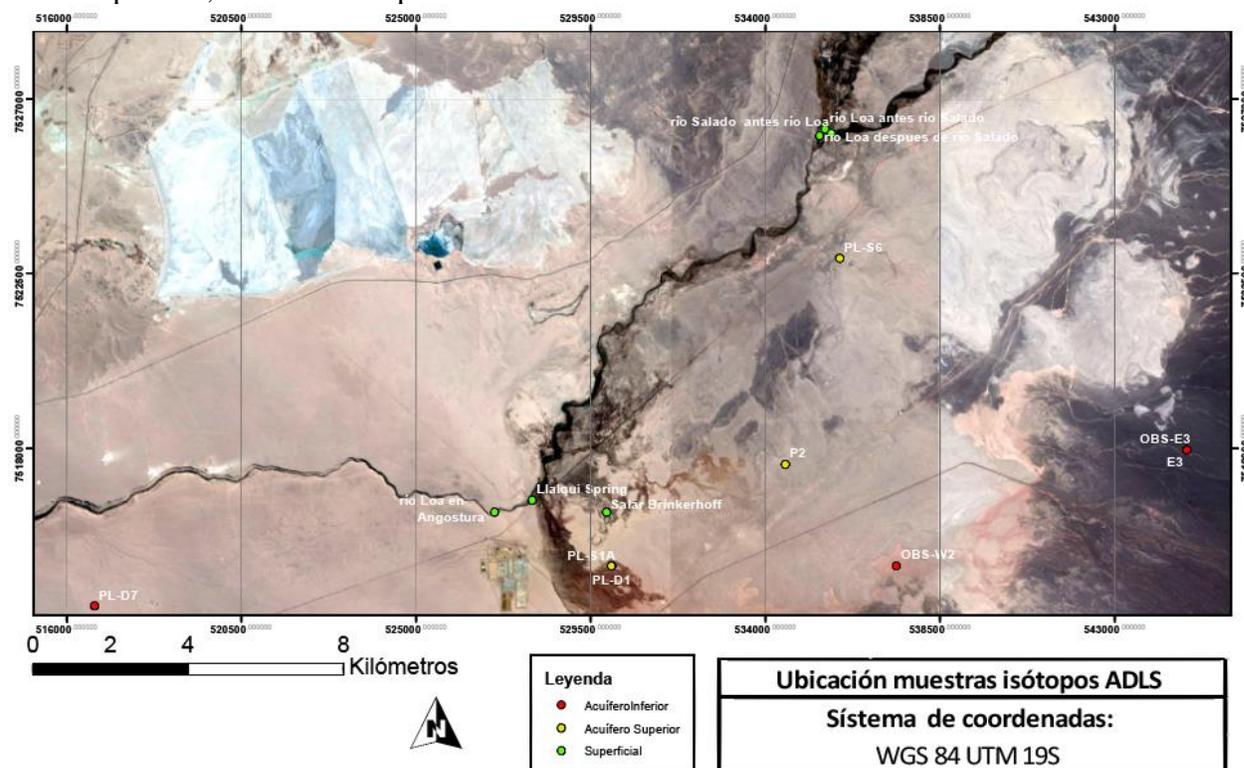


Figura 5.1: Mapa ubicación geográfica de muestras ADLS en las cuales se realizaron análisis de isotopía.

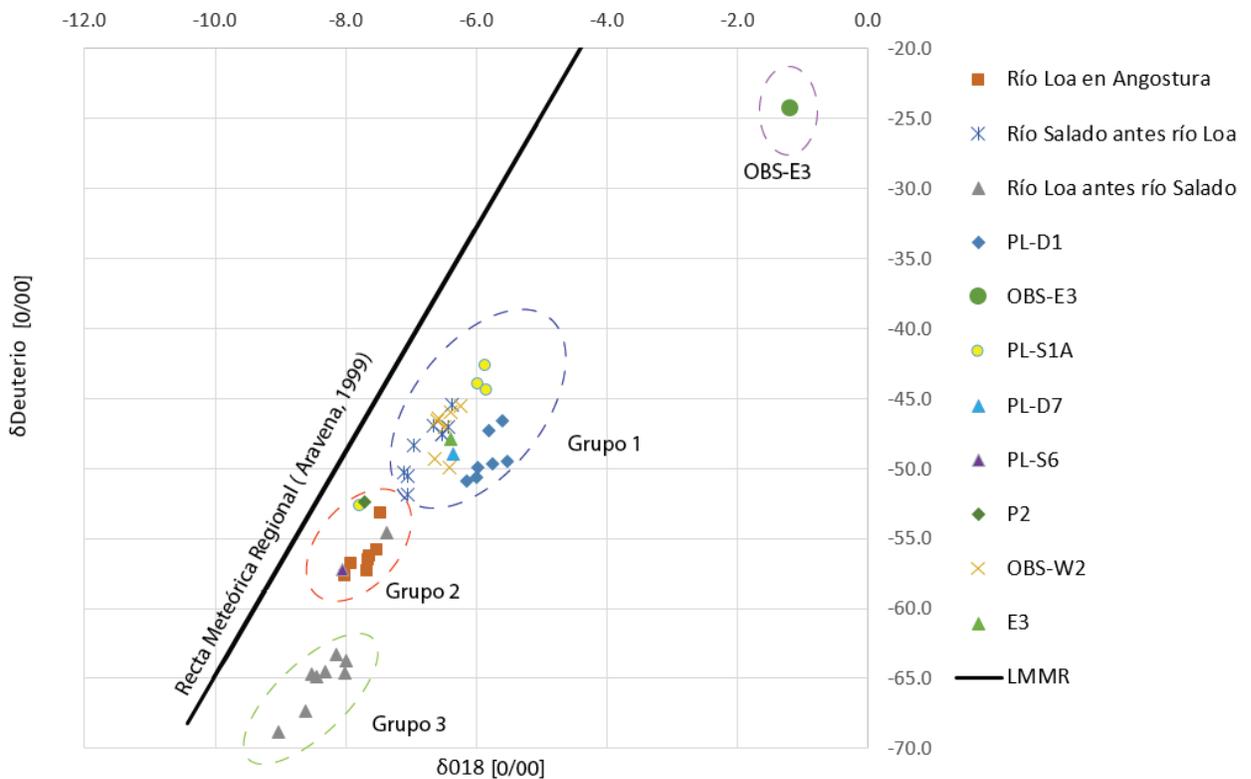


Figura 5.2: Gráfico  $\delta^2H$  vs  $\delta^{18}O$ , razón isotópica muestras sector Pampa Llalqui.

Estas presentaron una variación en la composición isotópica para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  lo que permitió agruparlas en distintos grupos. Dentro de los rangos de composición isotópica se pueden identificar 4 grupos:

Grupo 1: Conformado por muestras de aguas del río Salado antes de su confluencia con el río Loa y, los pozos PL-D7, OBS-W2, PL-D1, PL-S1A y P2.

Las muestras de agua superficial son 9 y corresponden a muestras del río Salado antes de su confluencia con el río Loa, los valores asociados varían entre -7.1 y -6.4 para  $\delta^{18}O$  y entre -51.9 y -45.5 para  $\delta^2H$ .

Por su parte, los pozos PL-S1A y P2, se encuentran habilitados en el acuífero superior, ambos se encuentran ubicados en el sector suroeste de Pampa Llalqui:

- El pozo PL-S1A, ubicado a metros del pozo PL-D1 al sur del río Loa, con una razón isotópica variable de  $\delta^{18}O$  entre -7.8 y -5.8, y de  $\delta^2H$  entre -53 y -44.
- El pozo P2 se encuentra ubicado en la parte central de la cuenca al sur del río Loa, presenta una composición isotópica de -7.7 y -52.4 para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.

Los pozos PL-D7, OBS-W2, OBS-E3 Y PL-D1 se encuentran habilitados en el acuífero inferior:

- El pozo PL-D7 se encuentra ubicado al sur del río Loa, y a pesar de que espacialmente se encuentra lejano a los demás pozos de Pampa Llalqui, los valores isotópicos para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  son -6.4 y -49.0 respectivamente, sus valores son muy similares a los demás pozos ubicados en la zona de estudio, pertenecientes al acuífero inferior.
- El pozo OBS-W2 se encuentra ubicado en el sector central de Pampa Llalqui, a 2 kilómetros del río Loa, con 7 muestras de composición isotópica que van de -6.4 a -6.2 para el  $\delta^{18}O$  y -50.0 a -45.6 para el  $\delta^2H$ .
- El pozo OBS-E3 ubicado en el límite sureste de Pampa Llalqui, presenta una composición isotópica de -6.35 y -47.85 para el  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente, similar a la de PL-D7.
- El pozo PL-D1 se encuentra ubicado al suroeste de Pampa Llalqui, con 7 muestras de composición isotópica que van de -6.1 a -5.5 y -50.9 a -46.6 para el  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.

Grupo 2: Corresponden a aguas superficiales del río Loa en Angostura después de la confluencia con el río Salado y pozo PL-S6.

- El pozo PL-S6 se encuentra ubicado 2 km al este del río Loa, habilitado en el acuífero superior,
- donde encontramos una sola muestra cuya composición es -8.1 para el  $\delta^{18}O$  y -57.3 para  $\delta^2H$ .
- Con respecto a las muestras de agua superficiales son 7, y fueron tomadas en la zona de Angostura, presenta una composición isotópica variable que fluctúa entre los -7.8 a -7.2 y -57.5 a -52 para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.

Grupo 3: El grupo 3 corresponde a muestras de agua superficiales tomadas en el río Loa, unos 200 metros antes de su confluencia con el río Salado. De un total de 9 muestras tomadas, estas presentaron composiciones isotópicas variables, en un rango de -9.0 a -7.4 y -68.9 a -54.6 para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.

Grupo 4: Conformado únicamente por la muestra OBS-E3 perteneciente al acuífero inferior a 500 metros de profundidad, al límite sureste de Pampa Llalqui, presenta una composición isotópica de -6.35 y -47.85 para el  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.

### 5.1.2 Grupos Minera Centinela

A continuación, se presentarán los análisis isotópicos realizados por la minera Centinela(MC), pertenecientes al Plan de Alerta Temprana, resolución 2341, del 10 de septiembre 2010, dictada por la DGA, que trimestralmente se compromete a realizar análisis isotópicos. Los datos utilizados fueron tomados durante el cuarto trimestre del 2015, estos corresponden a 8 cauces superficiales, 5 pozos habilitados en el acuífero superior y 8 pozos habilitados en el acuífero inferior. En la *figura 5.3* se puede observar la distribución espacial de las muestras tomadas.

Es de suma importancia ubicar las distintas muestras ya que posteriormente en el estudio la ubicación de las distintas muestras será crucial en la discusión, los puntos que se observan en la figura 5.3 corresponden a muestras agua tomadas en la red de pozos de Minera Centinela a las cuales se les practicó análisis isotópico

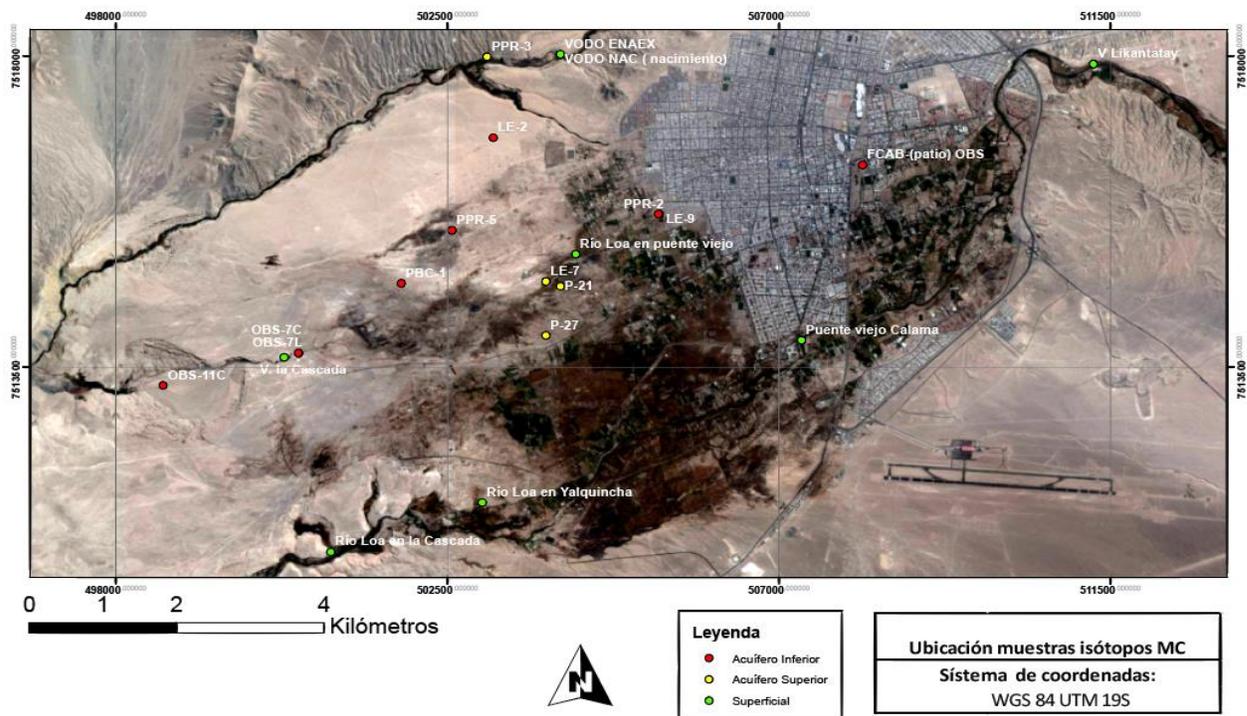


Figura 5.3: Mapa de ubicación geográfica de muestras de agua con información isotópica sector MC.

Para efectos de este análisis, las muestras han sido clasificadas en 3 distintos grupos según sus rangos de razones isotópica los cuales son detallados a continuación en el gráfico de la *figura 5.4*

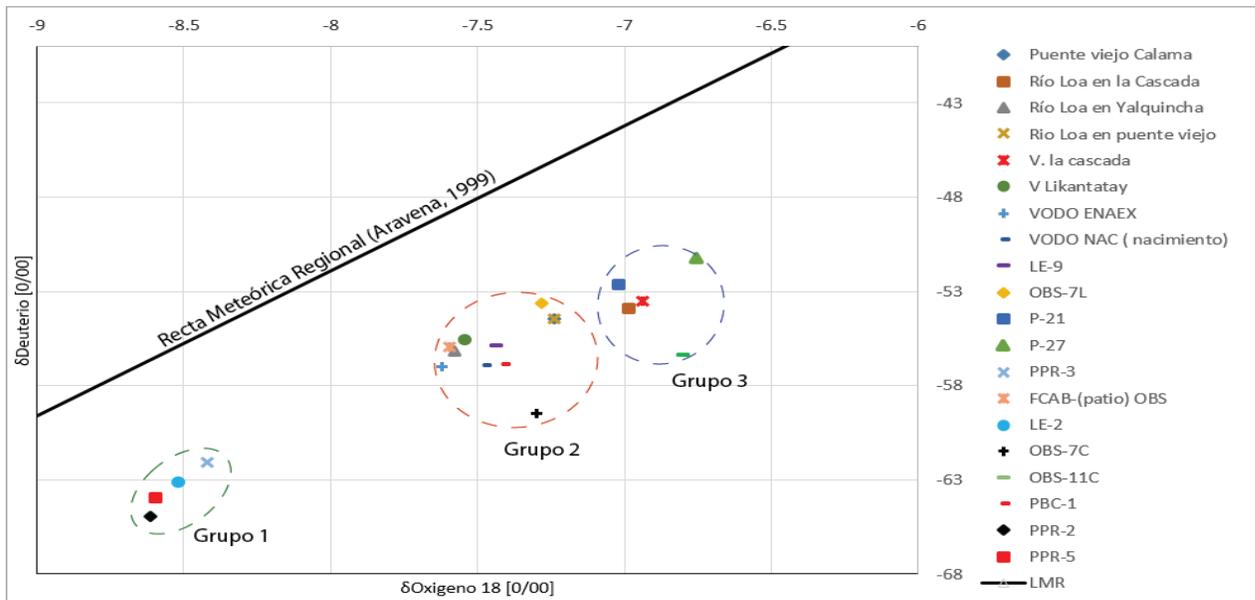


Figura 5.4: Gráfico  $\delta^2H$  vs  $\delta^{18}O$ , muestras red de pozos Minera Centinela.

**Grupo 1:** El primer grupo corresponde a muestras tomadas en el acuífero superior e inferior. Los pozos de donde fueron extraídas las muestras se encuentran cercanos entre sí, y ubicados al oeste de la ciudad de Calama como se observa en la figura 5.3.

- Pozos PPR-2, PPR-5 y LE-2, habilitados en el acuífero inferior, de composición isotópica variable cuyos valores fluctúan de -8.62 a -7.3 y -64.93 a -56.4 para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.
- PPR3 a diferencia de los demás pozos, se encuentra habilitado en el acuífero superior con valores de -8.42 y -62.08 para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.

**Grupo 2:** Las muestras del grupo 2 corresponden a muestras del acuífero superior, inferior y a aguas superficiales. La mayoría de las muestras fueron tomadas al oeste de la ciudad de Calama, con excepción de las muestras de agua superficiales V. Likantay y Puente Viejo que se ubican en el este y sur de la ciudad de Calama respectivamente. Por su parte el pozo F-CAB se encuentra ubicado en el centro de la ciudad de Calama.

- Corresponde a muestras de aguas superficiales VODO ENATEX, río Loa Yalquinche, V Likantay, río Loa en Puente Viejo, Puente Viejo Calama y VODO NAC. Los valores observados se encuentran en intervalos de 7.62 a -7.24, y -56.99 a -55.58 para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.
- Los pozos habilitados en el acuífero superior, también pertenecientes al grupo dos, corresponden a LE-9 y OBS-7L, presentan valores de -7.44 y -7.28 para el  $\delta^{18}O$  y -56.99 a -55.8 para  $\delta^2H$ .
- Por otro lado, los pozos habilitados en el acuífero inferior OBS-7C, PBC-1 Y FCAB, también pertenecientes al grupo dos, presentan composiciones que varían de -7.6 a -7.3 y -55.97 a -59.46  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.

Grupo 3: Este grupo está compuesto por aguas superficiales como también por pozos habilitados en el acuífero superior e inferior.

- Las muestras correspondientes a agua superficiales, Río Loa en la cascada y V la cascada, cuyas composiciones varían de -6.99 a -6.94 y -53.88 a -53.52 para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.
- Los pozos P-21 y P-27 habilitados en el acuífero superior, presentan valores de -7.02 a -6.76 y -52.62 a -5.23 para el  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.
- Finalmente, respecto de la muestra tomada en el acuífero inferior correspondiente a OBS-11C, se puede señalar que el valor de esta para  $\delta^{18}O$  corresponde a -6.8 y para  $\delta^2H$  -56.4.

### 5.1.3 Grupo División Ministro Hales

Los análisis isotópicos de División Ministro Hales (DMH) fueron realizados en el marco del Estudio de Impacto Ambiental, RCA 311/05 de noviembre 2004. Dicho estudio comprende el análisis de 97 muestras pertenecientes a flujos de agua superficial de los acuífero superior e inferior, con el fin de comprender a cabalidad la naturaleza de las distintas aguas pertenecientes a la cuenca de Calama.

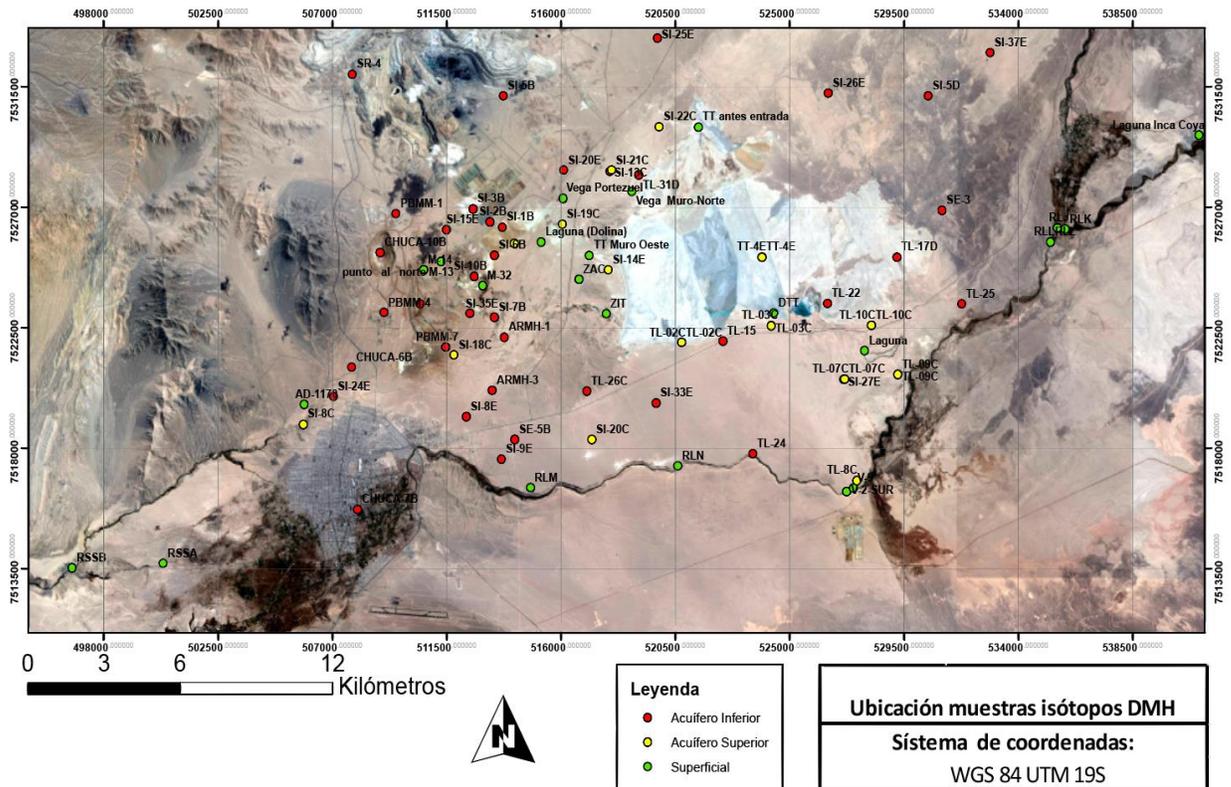


Figura 5.5: Mapa de ubicación geográfica de muestras con análisis isotópico DMH.

En la figura 5.5 se observa la ubicación geográfica de las muestras correspondientes a los pozos DMH, estos fueron clasificados en 7 grupos de razones isotópica de rangos determinados de  $\delta^{18}O$ . Vale prevenir, que la alta densidad de puntos dificultó la definición de tales grupos conforme a la similitud de sus composiciones isotópicas, por lo que los grupos no fueron representados en la figura 5.6.

La figura 5.6 se encuentra de disposición horizontal en el anexo B, página 125, sección de mapas y figuras con el fin de establecer más separación entre los símbolos usados para representar las distintas muestras en la red de pozos DMH.

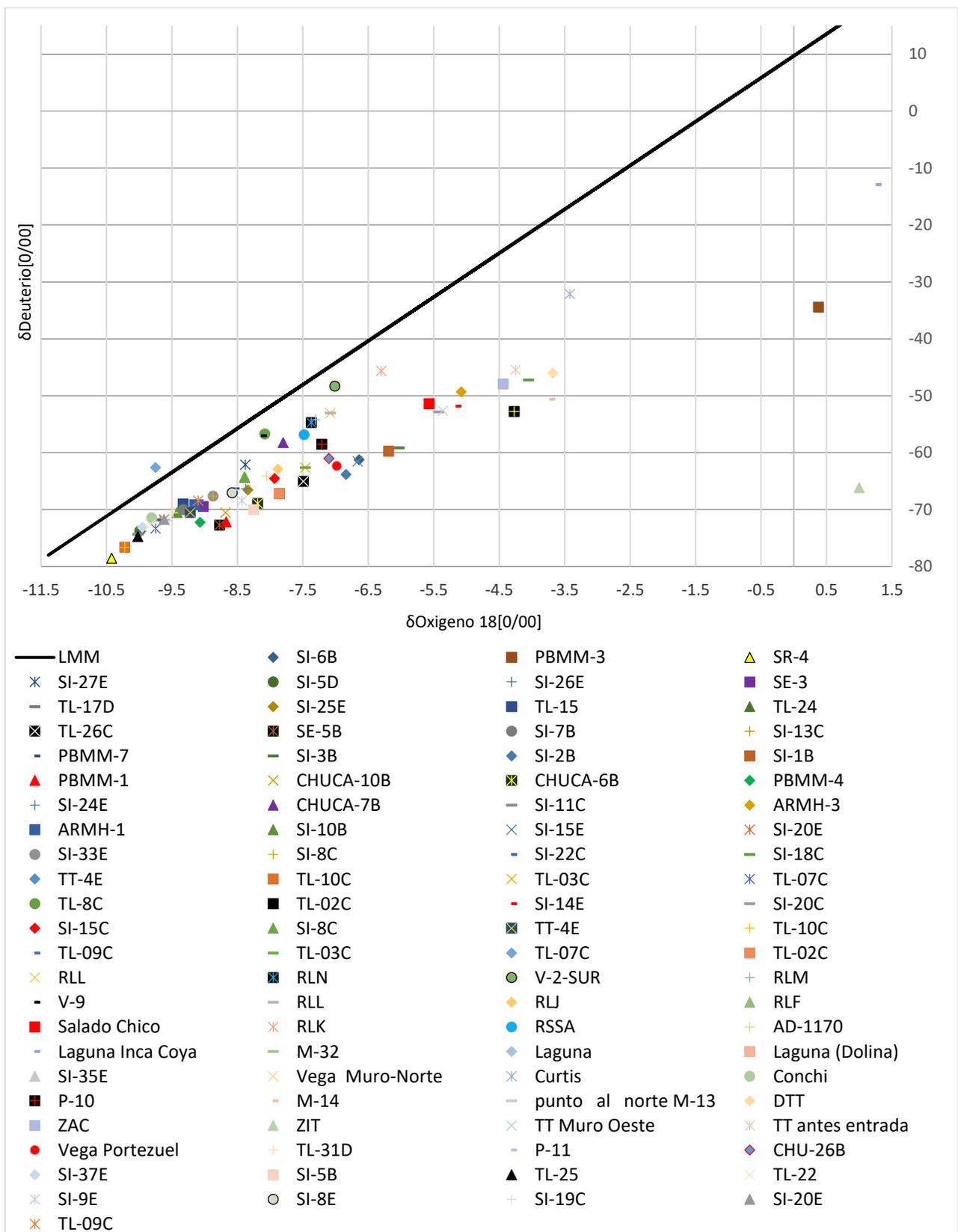


Figura 5.6: Gráfico  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$ , razón isotópica muestras red de pozos DMH, gráfico en plana completa y leyenda en anexo B.

Grupo 1: Este grupo corresponde a muestras aguas superficiales M-32, Laguna(Dolina), Vega muro Norte, cuyas composiciones isotópicas de  $\delta^{18}O$  en y  $\delta^2H$  varían de -6.68 a -8.43 y -5.8 a -8.7 respectivamente.

Grupo 2: Compuesto por muestras de aguas superficiales y pertenecientes al acuífero inferior.

- Las muestras de aguas superficiales corresponden a Laguna y Laguna Inca Coya, estas presentan composiciones isotópicas variables en rangos de para  $\delta^{18}O$  de 1.26 a 1.95 y -21.3 a -12.9 para  $\delta^2H$ .
- En cuanto a las muestras pertenecientes al acuífero inferior PBMM-3 y SI-35E, en estas se observan composiciones isotópicas variables en intervalos que van de 0.38 a 1.8 para el  $\delta^{18}O$ . -34.4 a -20.4 para  $\delta^2H$ .

Grupos 3:

- Curtis, DTT, M-14, TT antes entrada, punto al norte M-13 y ZAC, corresponden a muestras de agua superficial cuyas composiciones isotópicas muestran valores variables de  $\delta^{18}O$  que van de -50.6 a -32.1 y -4.44 a -3.42 para el  $\delta^2H$ .
- La muestra SI-18C pertenece al acuífero superior, en él se observa una composición de -4.05 para el  $\delta^{18}O$  y -47.9 para el  $\delta^2H$ .

Grupo 4: Este grupo presenta muestras pertenecientes a aguas superficiales, acuífero superior e inferior.

- Las muestras TT muro Oeste y Salado Chico corresponden a muestras de agua superficial cuya composición isotópica varía de y -5.57 a -5.36 y -52.6 a -51.4 para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.
- A su vez las muestras SI-14E Y ARMH-3 pertenecen al acuífero superior e inferior respectivamente las cuales muestran composiciones isotópicas en rangos de -5.08 a -5.16 para el  $\delta^{18}O$  y -52.6 y -51.4 para el  $\delta^2H$ .

Grupo 5:

- Los pozos habilitados en el acuífero inferior corresponden a SI-15C, SI-6B, SI-2B, CHUCA7B y TL-26C, para estos pozos se observa una composición isotópica que varía entre -7.8 hasta -6.66 para  $\delta^{18}O$  y para el caso de  $\delta^2H$  de -65.0 hasta -61.2.
- Las muestras pertenecientes al acuífero superior, TL-02C, TL-03C, SI-15C Y TL-8C por su parte presentan composiciones variables para el  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  en rangos de -8.8 a -7.46 y -67.2 a -56.7 respectivamente.
- V-2 sur, RLL, Yalquincha, Vega portezuelo, CHU-26B, P-10, RLM, RLN, RSSA, Chiu-Chiu, AD-1170 y V9, corresponden a muestras de agua superficial cuyas composiciones isotópicas varía en intervalos de -8.13 a -6.98 para  $\delta^{18}O$  y entre -64.1 a -48.3 para  $\delta^2H$ .

Grupo 6: Este grupo está compuesto por pozos pertenecientes al acuífero superior e inferior como también a una sola muestra de agua superficial.

- SI-27, SI-25E, CHUCA-6B, SE-5B, SI-24E, SI-9E, SI-8E, SI-33E, CHUCA-10B, PBMM-1 y SE-5B, corresponden a pozos habilitados en el acuífero inferior y su composición isotópica varía entre -8.87 a -8.19 y -72.7 a -62.1 para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente.
- Los pozos habilitados en el acuífero superior son SI-8C, SI-19C, dentro los cuales se observa una composición isotópica en rangos de -8.52 a -8.39 para el  $\delta^{18}O$  y -66.5 a -64.2 para el  $\delta^2H$ .
- La única muestra de agua superficial exhibe una composición de -8.57 para el  $\delta^{18}O$  y una de -66.1 para el  $\delta^2H$ .

Grupo 7: Conformado por muestras de agua superficial y pertenecientes al acuífero superior e inferior.

- Las muestras de aguas superficiales corresponden a Conchi y P-11, estas presentan composiciones isotópicas variables en rangos de -9.81 a -9.6 para  $\delta^{18}O$  y de 71.8 a -71.4 para  $\delta^2H$ .
- En cuanto a las muestras pertenecientes al acuífero inferior SE-3, PBMM-4, TL-17D, SR-4, TL-25, SI-37E, TL-22, TL-31D, SI-10B, TL-15, SI-10B, SI-7B, SE-3, ARMH-1 y TL-15, en estas se observan composiciones isotópicas variables en intervalos que van de -10.42 a -9.02 para  $\delta^{18}O$  y -78.5 a -69.0 para el  $\delta^2H$ .
- Finalmente, las muestras pertenecientes al acuífero superior corresponden a TL-09C, TL-10C, TL-07C, SI-21C y TT-4E, las cuales comprenden composiciones isotópicas de  $\delta^{18}O$  que van de -10.22 a -9.1 y  $\delta^2H$  variable entre -76.6 y -68.4.

## 5.2 Niveles piezométricos.

A continuación, se presentará la recopilación de los niveles piezométricos de pozos habilitados en el acuífero superior e inferior. Las campañas de monitoreo y muestreo fueron realizadas por la División Ministro Hales, Minera Centinela y Aguas de la Sierra. Cabe destacar que las mediciones no fueron realizadas durante el mismo periodo, a pesar de esto, estas abarcan los últimos 8 años.

La División Ministro Hales realizó sus mediciones durante el periodo comprendido entre el 2007 y 2015, obteniendo promedios con el fin de evitar las variaciones estacionales.

Minera Centinela cuenta con registros tomados entre enero y febrero del 2016

ADLS realizó sus mediciones durante mayo del 2016.

Para una mejor interpretación y comparación de los niveles piezométricos en el presente estudio, fue necesario representar geográficamente los distintos pozos. En la *figura 5.7* se observan los distintos pozos habilitados en el acuífero superior e inferior, estos registran niveles estáticos según corresponda.

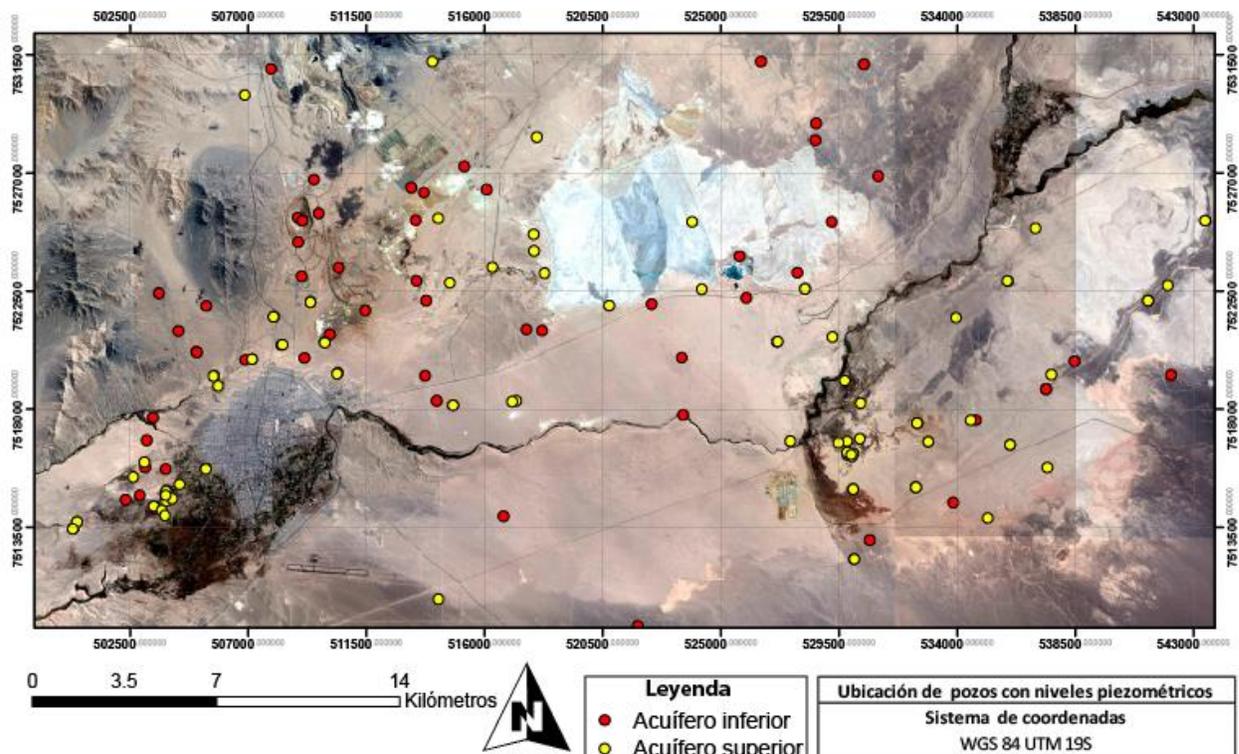


Figura 5.7: Pozos pertenecientes al acuífero superior e inferior con registro de niveles estáticos correspondiente a las 3 zonas de estudio.

### **5.2.1 Niveles Piezométricos acuífero superior e inferior**

Con el objetivo de rescatar la mayor cantidad de información disponible sobre los niveles piezométricos y su variación espacial en la cuenca de Calama. Se menciona la ubicación geográfica de los pozos habilitados en acuífero superior e inferior que registren máximos y mínimos piezométricos para las zonas de ADLS, MC y DMH.

#### **Acuífero Inferior**

- En la zona de Pampa Llalqui los niveles piezométricos muestran una variación entre 2641 a 2337 ms.n.m. para los pozos DC-2 y PL-D7 respectivamente. El pozo que registra el nivel piezométrico más bajo se encuentra aguas debajo de la zona de descarga. Mientras que el pozo DC-2 se encuentra ubicado en la parte central de la cuenca Pampa Llalqui.
- Los pozos pertenecientes a MC presentan niveles piezométricos variables entre 1988 ms.n.m. para el pozo OBS-11C y 2213 para el pozo OBS-6Li. Ambos pozos se encuentran ubicados al oeste de la ciudad de Calama, siendo OBS-11C el más alejado de la zona de estudio.
- DMH registra niveles piezométricos de hasta 2600 ms.n.m. en el pozo SI-6D ubicado en la parte alta de la cuenca de Calama. Por el contrario, el pozo SI-23C ubicado al norte de la ciudad de Calama registra niveles mínimos de 2101 ms.n.m.

#### **Acuífero superior**

- En la cuenca de Pampa Llalqui se observan que las cotas varían de 2546 ms.n.m. en la parte alta (W-3) hasta 2466 ms.n.m. en la parte baja (DC-1).
- Los pozos pertenecientes a MC presentan niveles piezométricos más bajos, estos varían entre 2189 ms.n.m. para el pozo LE-4 y 2220 ms.n.m. para el pozo LE-9. Ambos pozos se encuentran ubicados al oeste de la ciudad de Calama, a no más de 2 kilómetros entre sí.
- DMH registra niveles piezométricos de hasta 2534 msnm en el pozo TT-4E ubicado en Tranque Talabre. Por su parte, el pozo CC-1 ubicado al norte de Calama registra niveles mínimos de 2101 ms.n.m.

### **5.3 Isopiezas acuífero superior e inferior**

Luego de recopilar la información de los niveles y representar geográficamente la ubicación de los pozos, fue posible el uso de herramientas geoestadísticas. A través de *Arcgis* se realizó un *Kriging*, el cual realiza una interpolación de puntos generando un mapa de isopiezas y áreas de colores que buscan definir un rango de nivel piezométrico. Finalmente, se generó un mapa de curvas piezométricas, las cuales fueron realizadas cada 10 metros, para el acuífero superior e inferior como se observa en las *figuras 5.8 y 5.9* respectivamente.

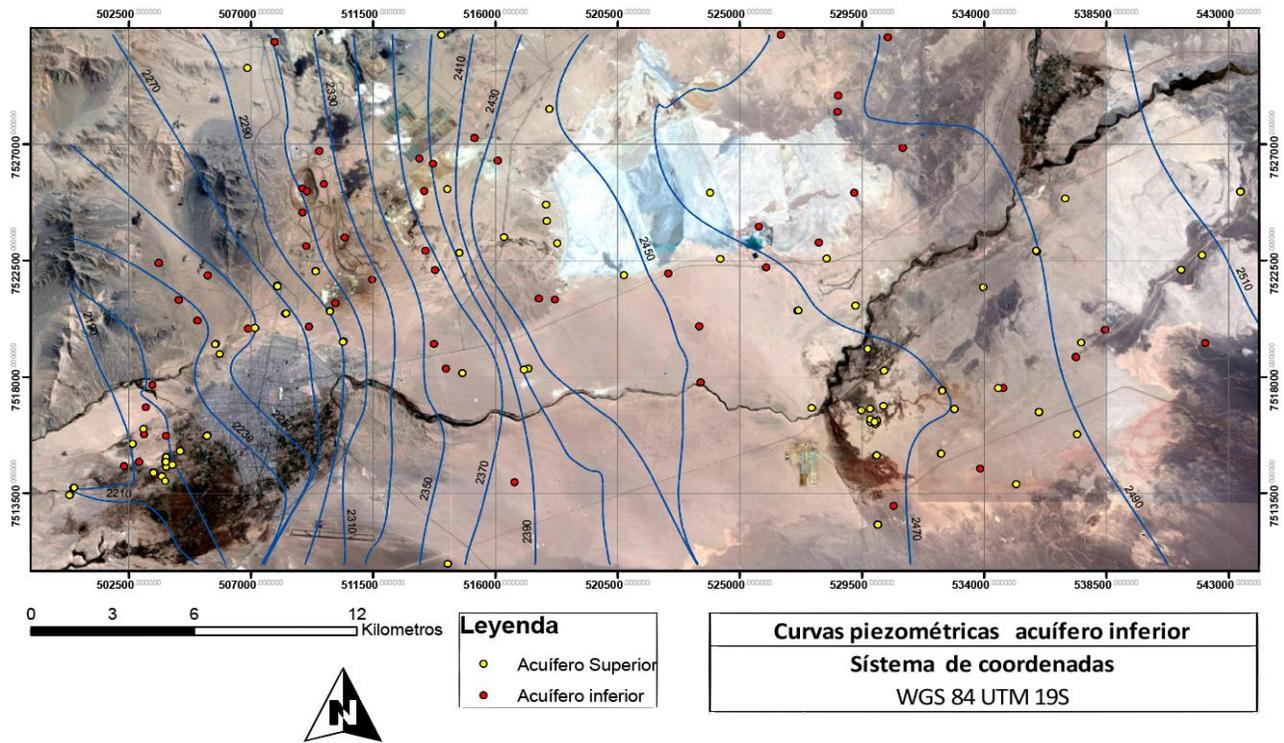


Figura 5.8: Mapa de curvas piezométricas generadas a partir del Kriging del acuífero superior, con una resolución de 10 metros.

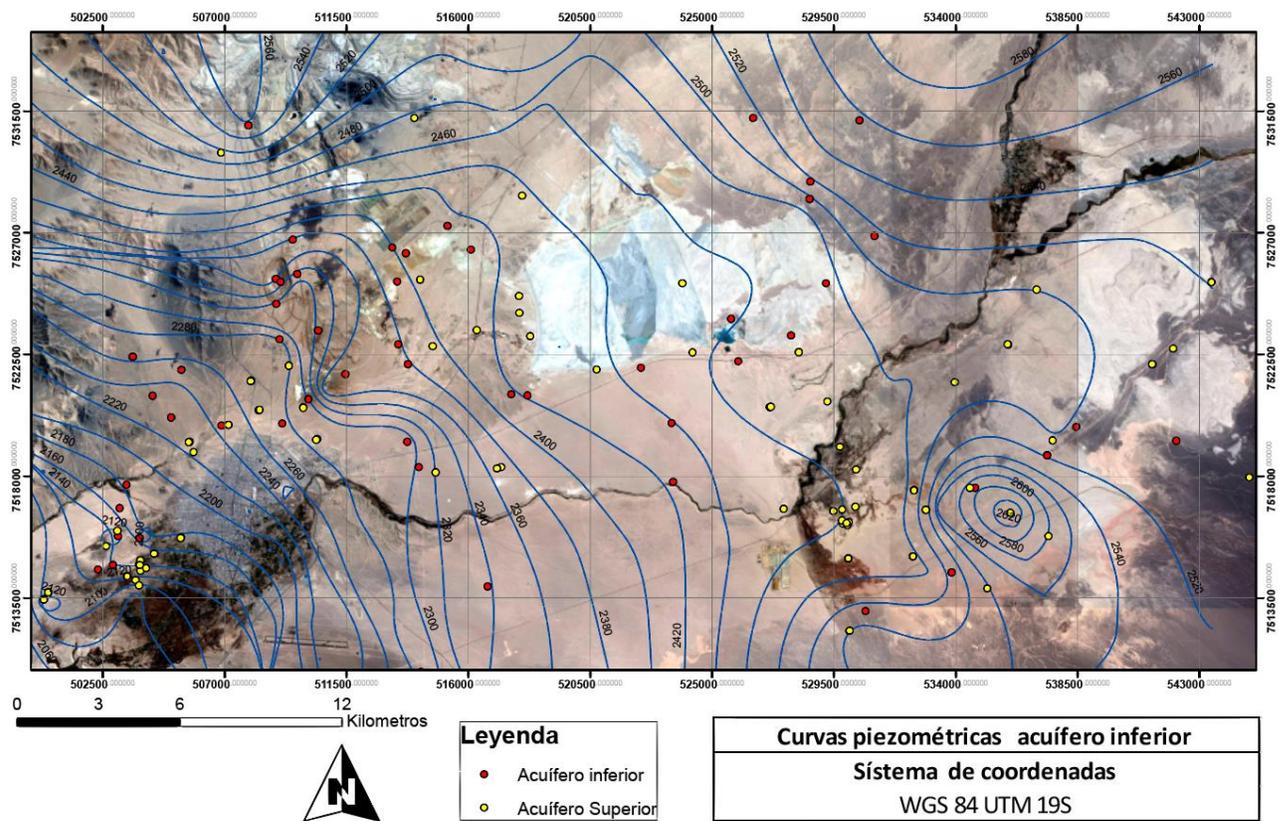


Figura 5.9: Mapa de curvas piezométricas generadas a partir del Kriging del acuífero inferior, con una resolución de 10 metros.

## 5.4 Sólidos totales disueltos

También se cuenta con información de los análisis de composición y calidad química del agua para las distintas redes de pozos dentro de la cuenca de Calama. Estos datos fueron entregados por ADLS y solicitados a través de ley de transparencia la DGA y a la Superintendencia del medio ambiente para los pozos correspondientes a la División Ministros Hales y minera Centinela. Producto de la gran cantidad de datos el estudio se limita a la revisión de los STD.

A continuación, se grafican las concentraciones de STD para las distintas muestras tomadas por ADLS, MC y DMH. Para una mejor interpretación los nombres de los diferentes pozos disponen en el eje X, mientras que el eje Y corresponde a la concentración de STD en ppm.

### 5.4.1 Grupo Aguas de la Sierra (ADLS)

En la *figura 5.10*, se observa la ubicación geográfica de los puntos correspondientes al muestro de agua, sector de Pampa Llalqui. Los análisis químicos e información fueron levantadas por las empresas mineras Nazca y ADLS en el marco de estudios para adjudicación de derechos de agua (Nazca) y plan de alerta temprana por parte de ADLS. Dentro del sector de Pampa Llalqui se tomaron un total de 36 muestras en campañas realizadas entre el año 2011 al 2013 por ADLS, entre los años 2000 y 2001 por Nazca.

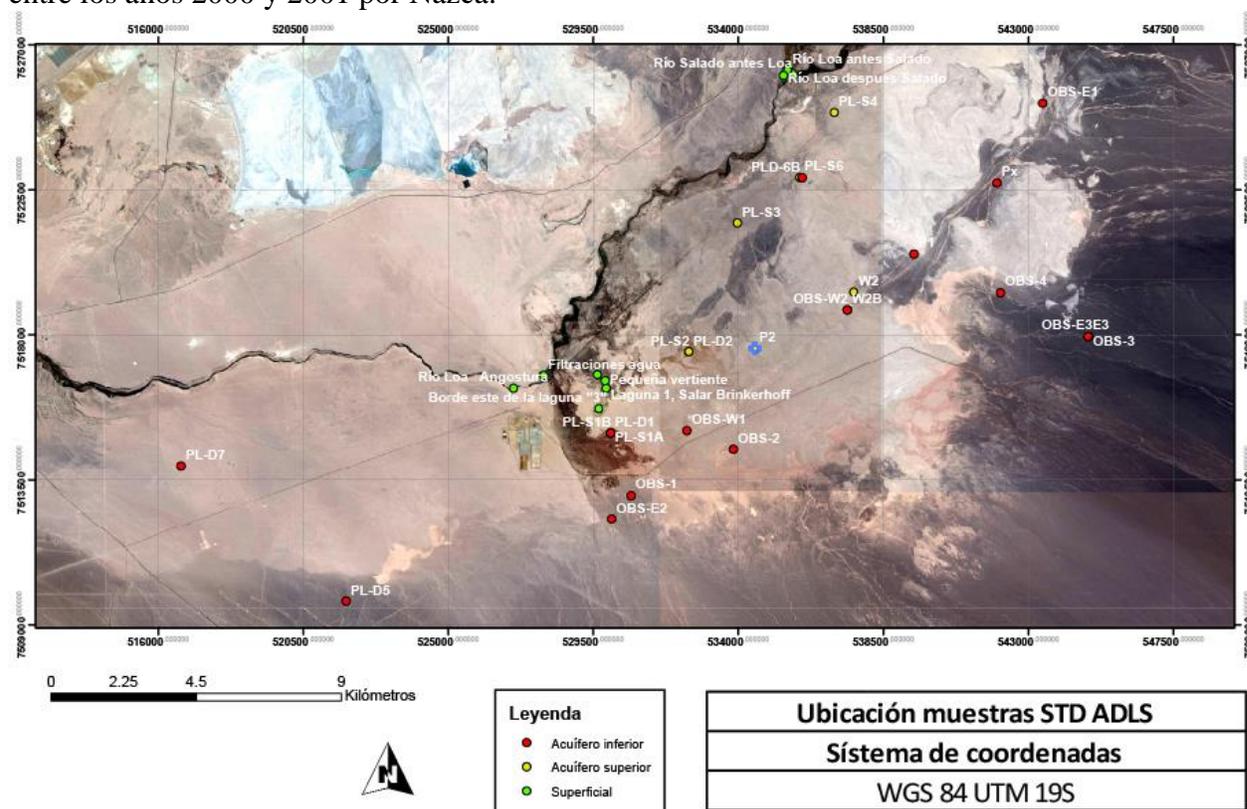


Figura 5.10: Mapa ubicación geográfica muestras con análisis químico de STD realizado por ADLS.

Entre las figuras 5.11 y 5.13 se observa un total de 51 muestras de agua, correspondientes a aguas superficiales y acuíferos superior e inferior. Las muestras de agua fueron tomadas en distintas fechas, pero en función de eso se puede agruparlas en 2 grupos, el primer grupo fue tomado entre el 2010 y el 2013 y el segundo grupo fue tomado entre el año 2000 y 2001.

El primer grupo corresponde a las muestras tomadas por ADLS, las cuales serán subdivididas 3 gráficos: aguas superficiales, acuífero superior y acuífero inferior.

En el gráfico de la *figura 5.11* presentado a continuación, se observan un total de 10 muestras de aguas superficiales, las cuales fueron tomadas en distintas zonas de Pampa Llalqui.

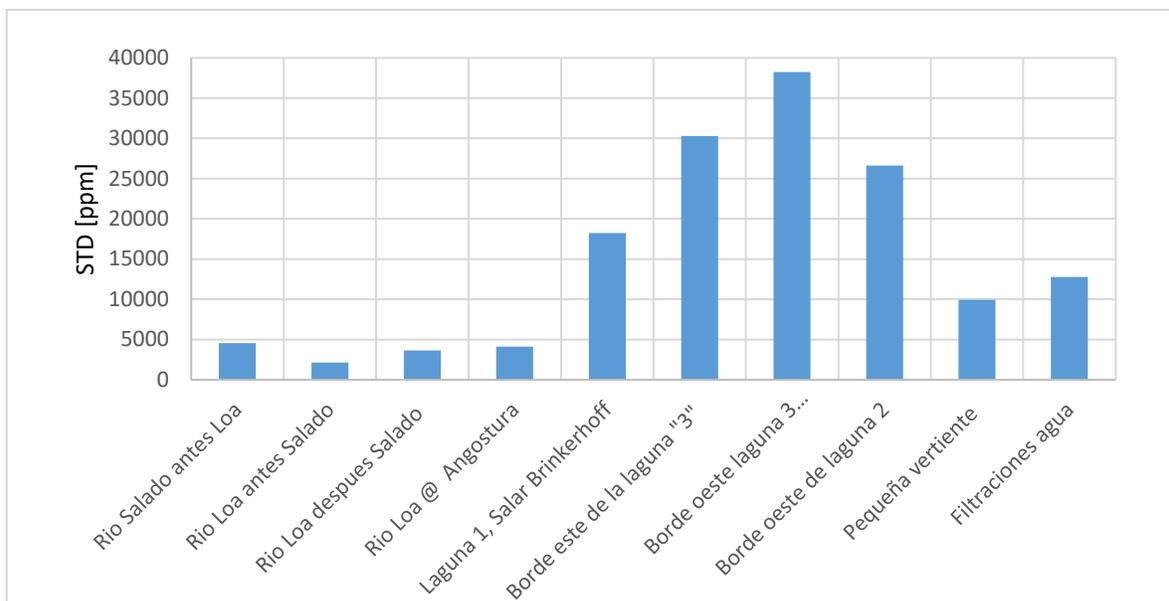


Figura 5.11: Gráfico de concentración STD para aguas superficiales sector Pampa Llalqui, muestreo ADLS.

En la *figura 5.12*, se observan 9 muestras pertenecientes al acuífero superior en la zona de Pampa Llalqui. Los distintos valores entre paréntesis indican la profundidad a la cual fue extraída cada muestra.

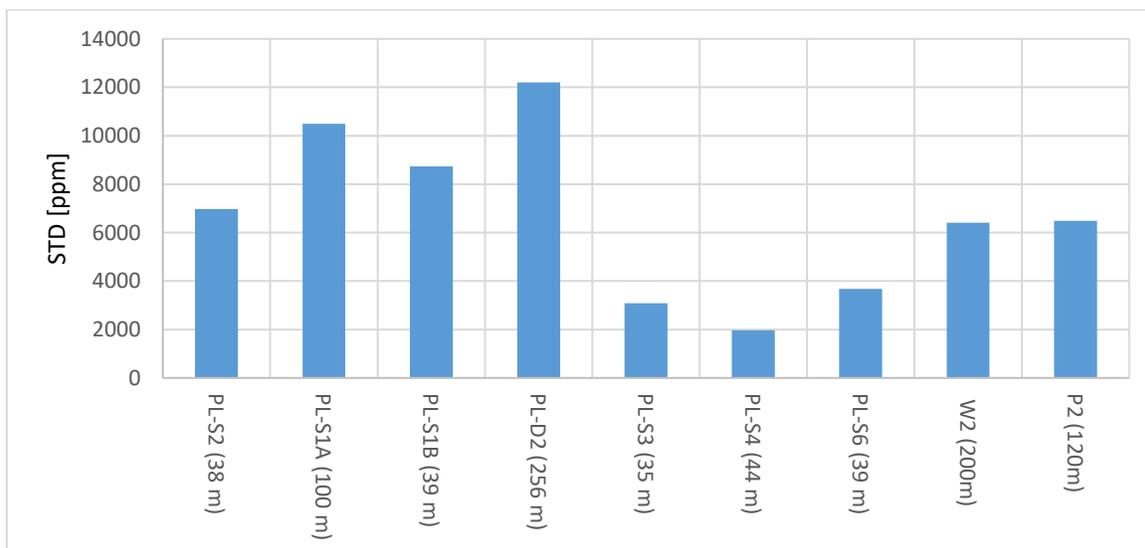


Figura 5.12: Gráfico concentración STD para muestras acuífero superior ADLS.

En la figura 5.13, se observan un total de 15 muestras, las cuales fueron tomadas desde el acuífero inferior en la zona de Pampa Llalqui.

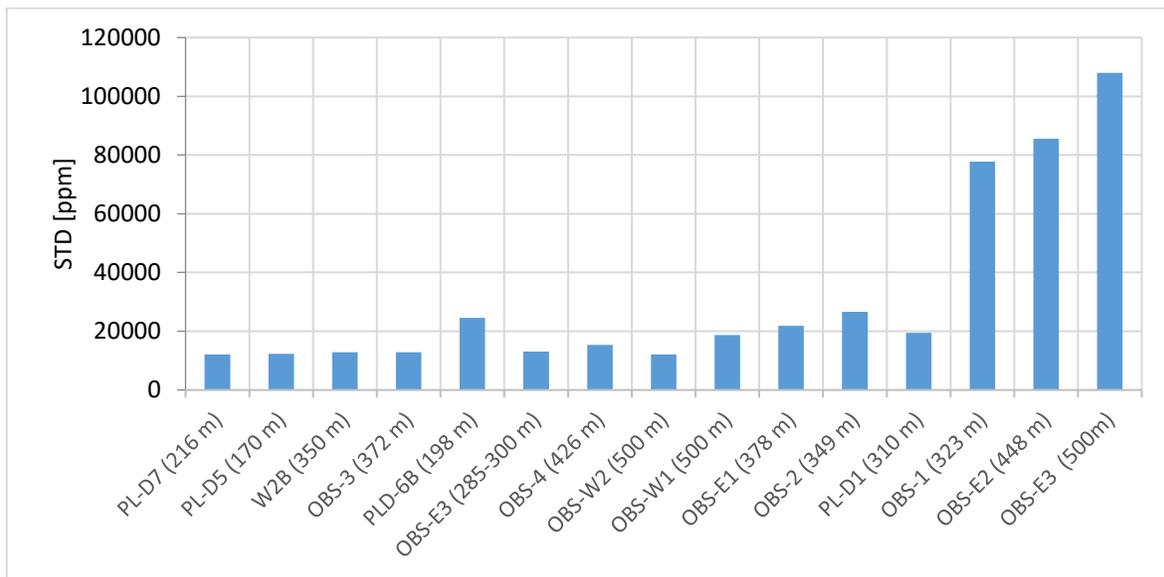


Figura 5.13: Gráfico concentración STD para muestras acuífero inferior ADLS. Los valores entre paréntesis corresponden a la profundidad en la cual se tomó la muestra.

El grupo 2 corresponde a los pozos construidos por Nazca, todos habilitados en el acuífero inferior. Los valores presentados a continuación corresponden a promedios, debido a que muestreo no fue realizado en la misma fecha, sino que en el transcurso de todo un año.

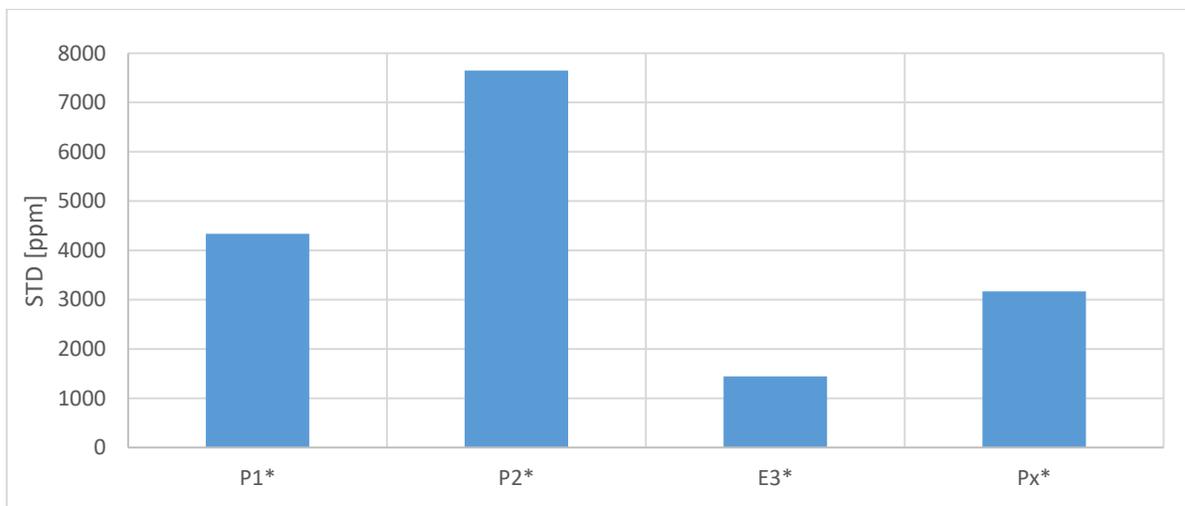


Figura 5.14: Gráfico concentración STD para las muestras del acuífero inferior zona Pampa Llalqui, muestreo realizado por Nazca.

## 5.4.2 Grupo Minera Centinela (MC)

En la *figura 5.15*, se observa la distribución espacial del muestreo realizado por la minera Centinela, realizado en un marco de Plan de Alerta Temprana. Los datos utilizados fueron tomados durante el cuarto trimestre del 2015, estos corresponden a 8 cauces superficiales, 5 pozos habilitados en el acuífero superior y 10 pozos habilitados en el acuífero inferior.

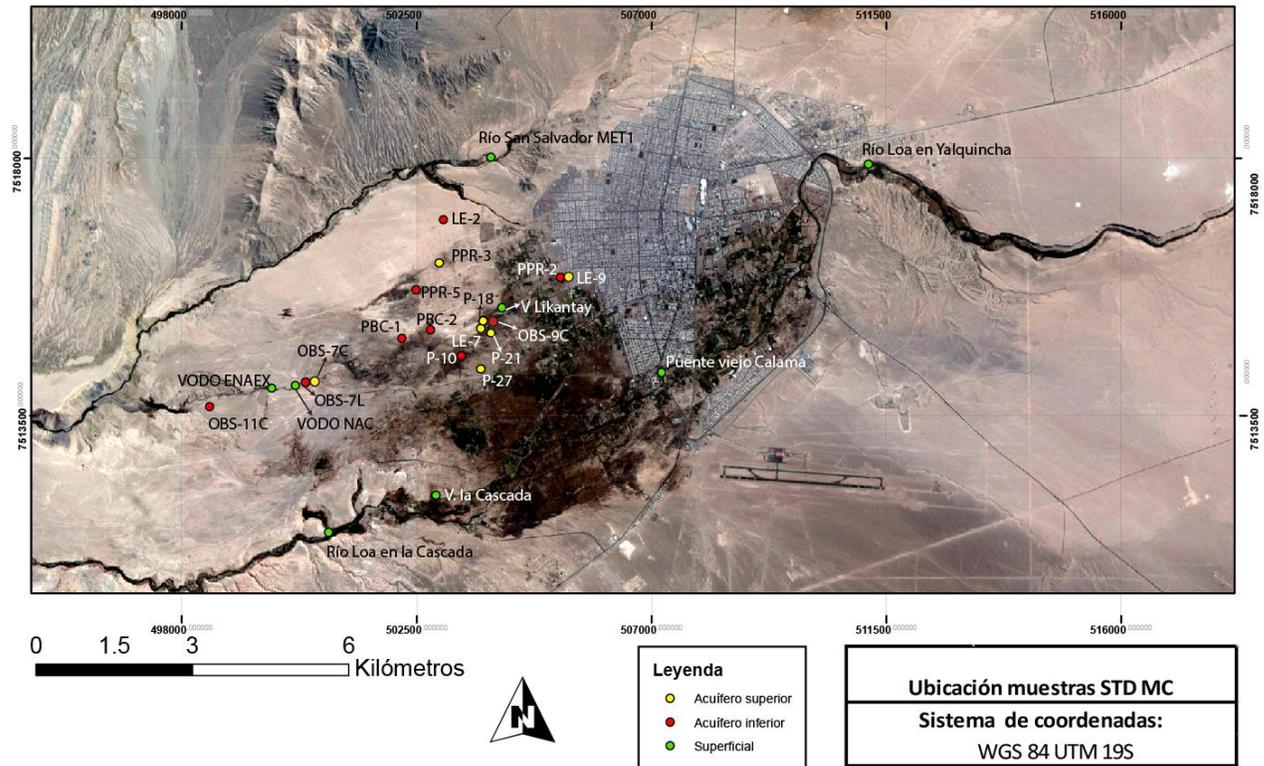


Figura 5.15: Mapa ubicación geográfica muestreo con análisis químico de STD realizado por MC.

En las figuras 5.16, 5.17 y 5.18 se observa un total de 22 muestras, las cuales fueron tomadas durante la segunda semana de diciembre de 2015. A continuación, se separarán las muestras en tres gráficos:

El primer gráfico corresponde a la *figura 5.16*, en el cual se observa la concentración de STD para ocho muestras de agua superficial.

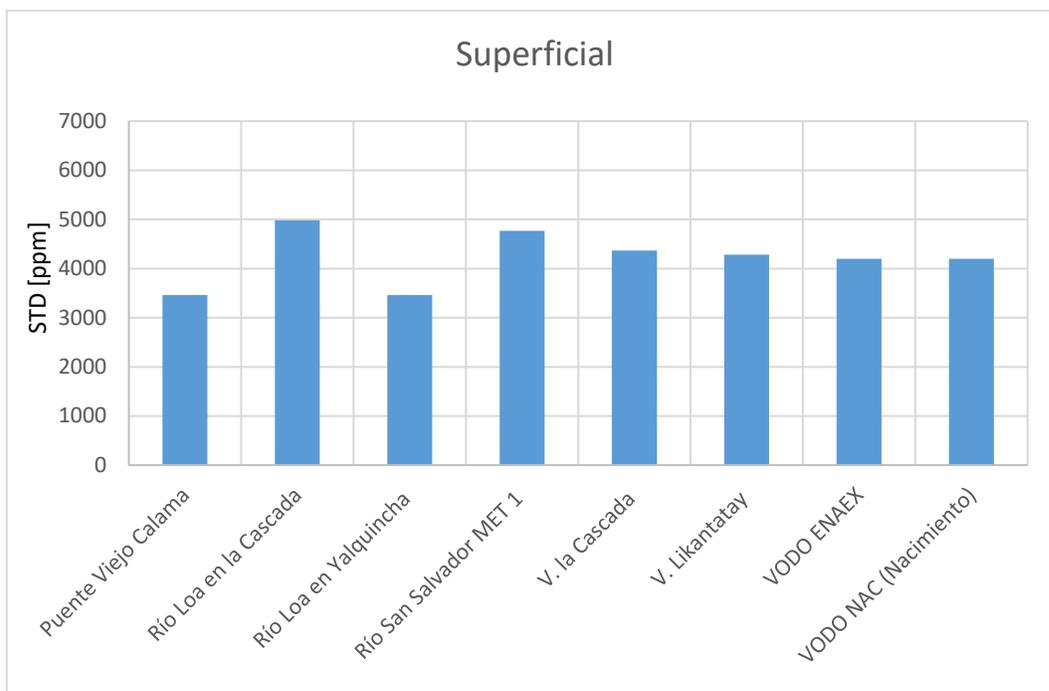


Figura 5.16: Gráfico de concentración STD para muestras de aguas superficiales sector MC.

En segundo lugar, se presenta la *figura 5.17*, en dicho gráfico se observa la concentración de STD en cinco muestras de agua, todas pertenecientes al acuífero superior.

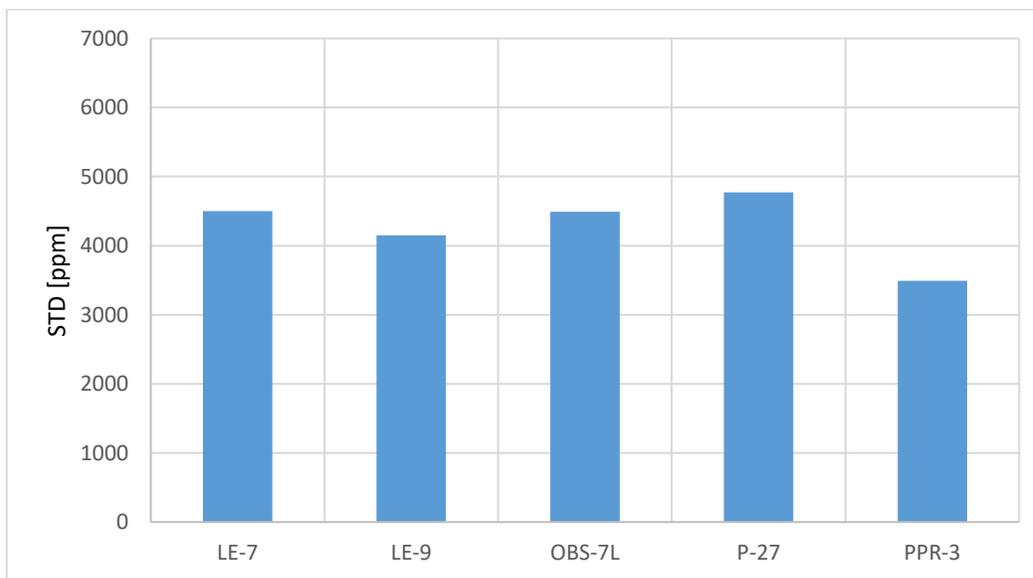


Figura 5.17: Gráfico de concentración STD en los pozos habilitados en el acuífero superior sector MC.

Finalmente, en la figura 5.18 presenta un gráfico con la concentración de STD de diez muestras pertenecientes al acuífero inferior.

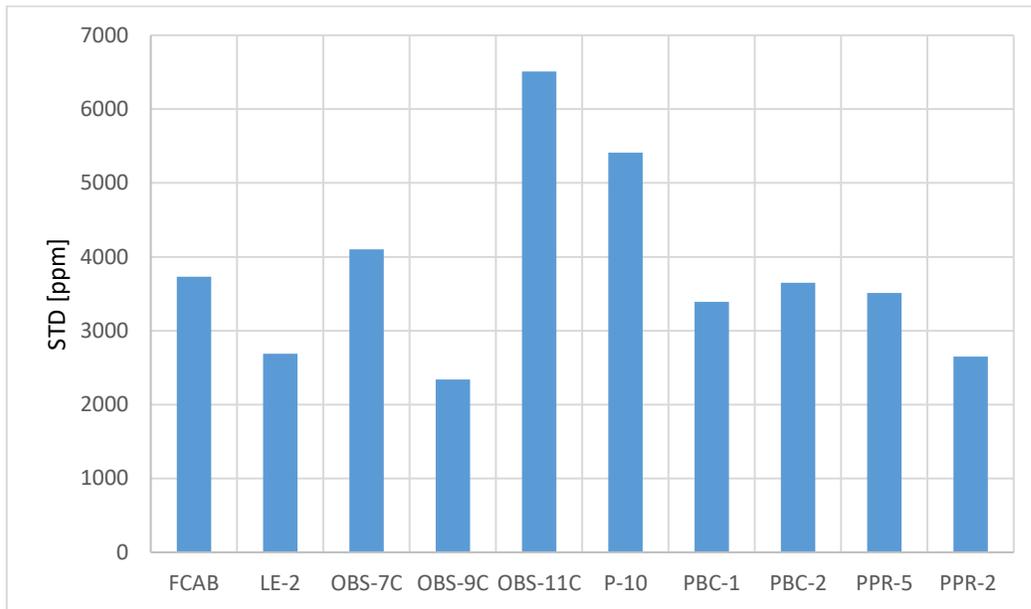


Figura 5.18: Gráfico de concentración STD en pozos habilitados en el acuífero inferior sector MC.

### 5.4.3 Grupo División Ministro Hales (DMH)

En la figura 5.19, se observa la ubicación geográfica de los análisis químicos de División Ministro Hales, los cuales fueron realizados en el marco del Estudio de Impacto Ambiental. De dicho estudio se tomó el análisis de 63 muestras pertenecientes a flujos de agua superficial y de los acuífero superior e inferior realizados durante año 2015.

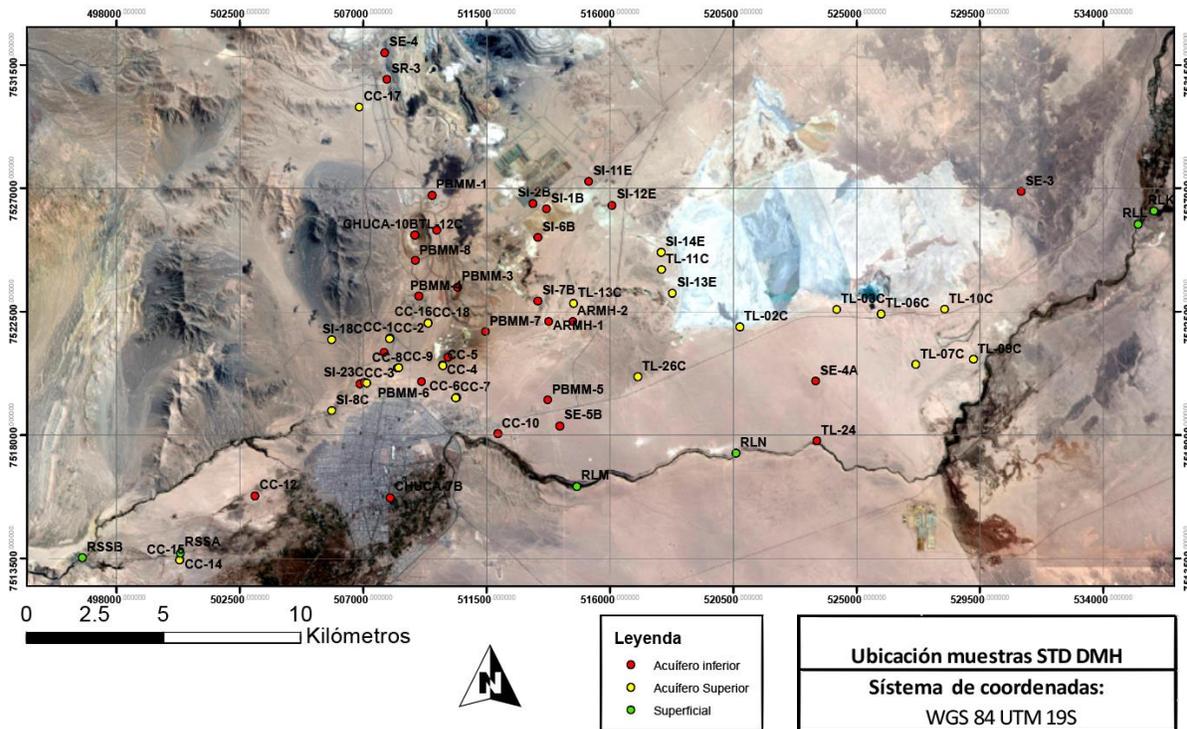


Figura 5.19: Mapa ubicación geográfica muestreo de STD realizado por DMH.

De la figura 5.20 a la figura 5.24, se observan 5 gráfico con un total de 66 muestras de agua correspondientes a aguas superficiales y acuíferos superior e inferior. Las muestras de agua fueron tomadas en el transcurso del año 2015. Se agrupó los distintos pozos según sus siglas para poder apreciar los STD con mayor detalle.

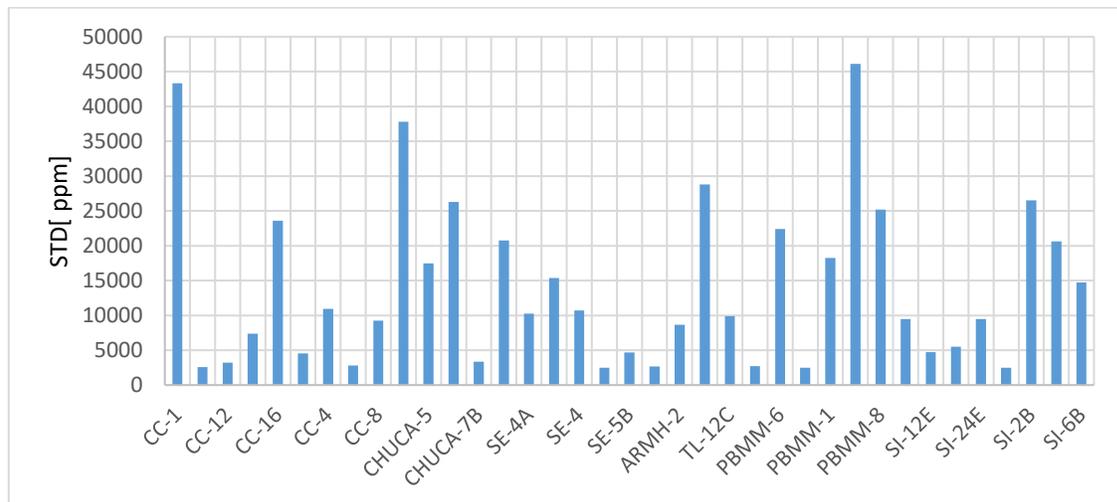


Figura 5.20: Gráfico 1 concentración STD red de pozos DMH.

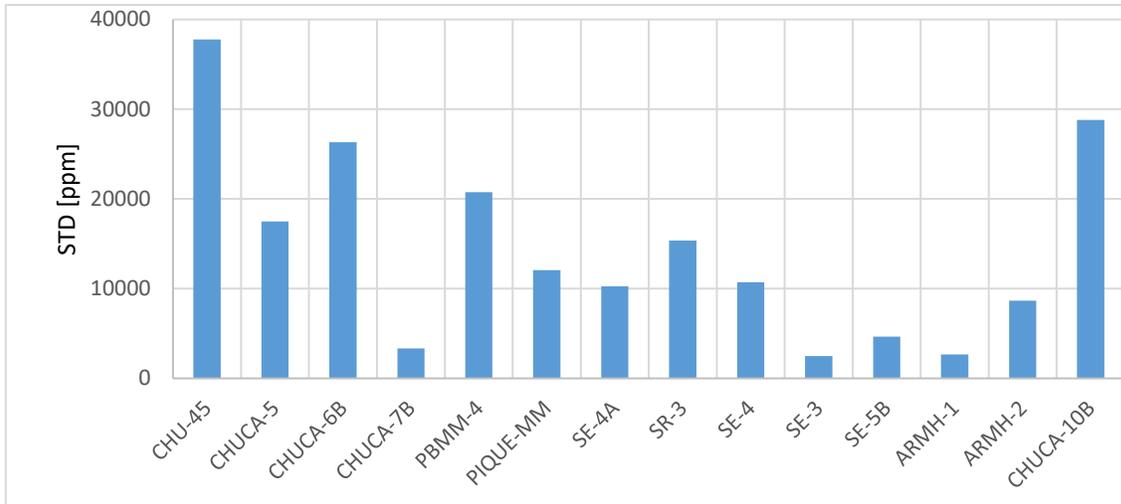


Figura 5.21: Gráfico 2 concentración de STD red de pozos DMH.

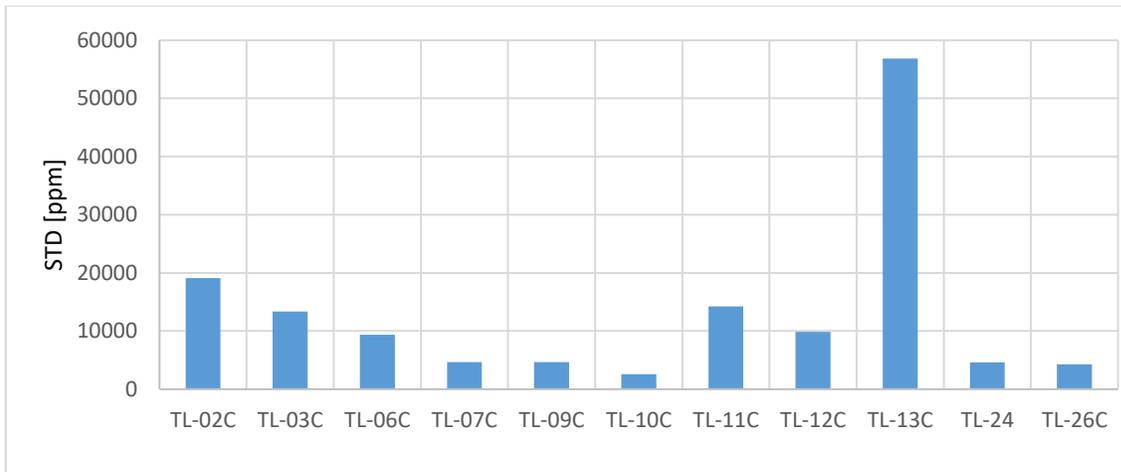


Figura 5.22: Gráfico 3 concentración STD red de pozos DMH.

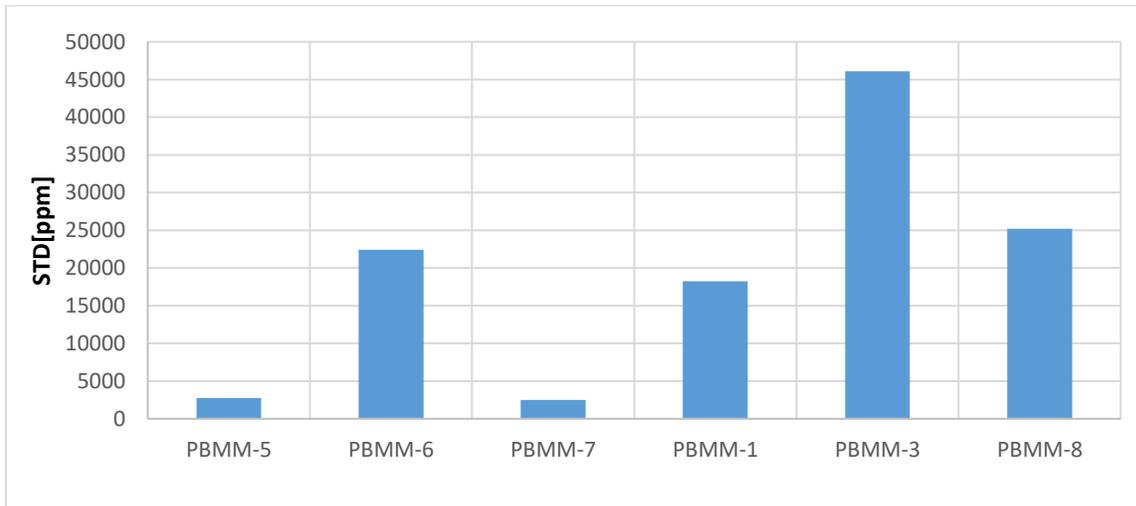


Figura 5.23: Gráfico 4 concentración STD red de pozos DMH.

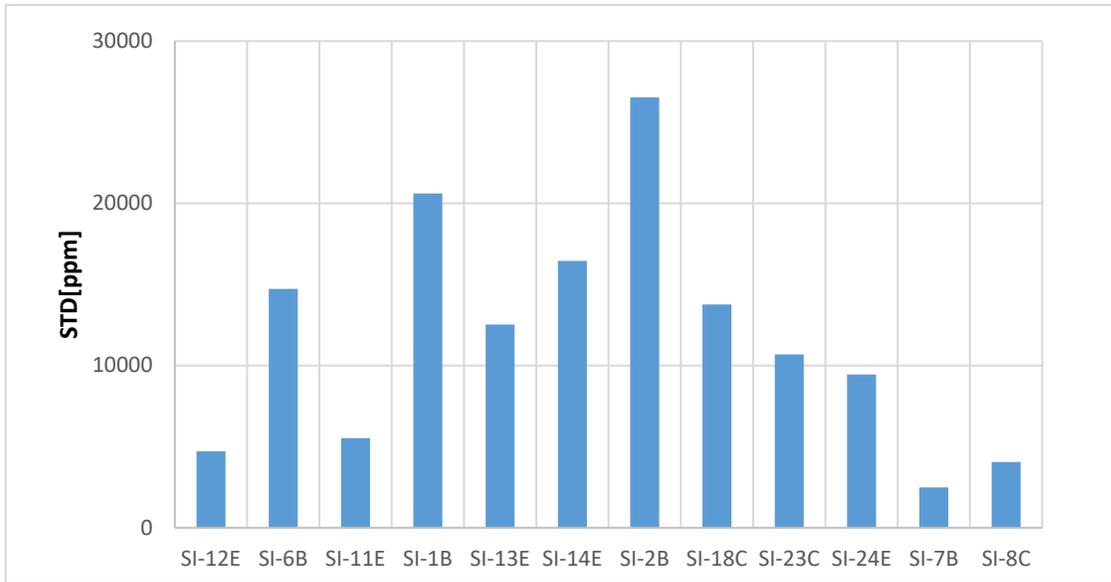


Figura 5.24: Gráfico 5 concentración STD red de pozos DMH.

## 5.5 Diagramas de Piper

Para una clasificación más clara de las aguas de la cuenca de Calama se graficaron las muestras en diagramas de Piper, estos fueron utilizados en la red de pozos de ADLS, MC y DMH tanto para las muestras de agua superficial, como del acuífero superior e inferior.

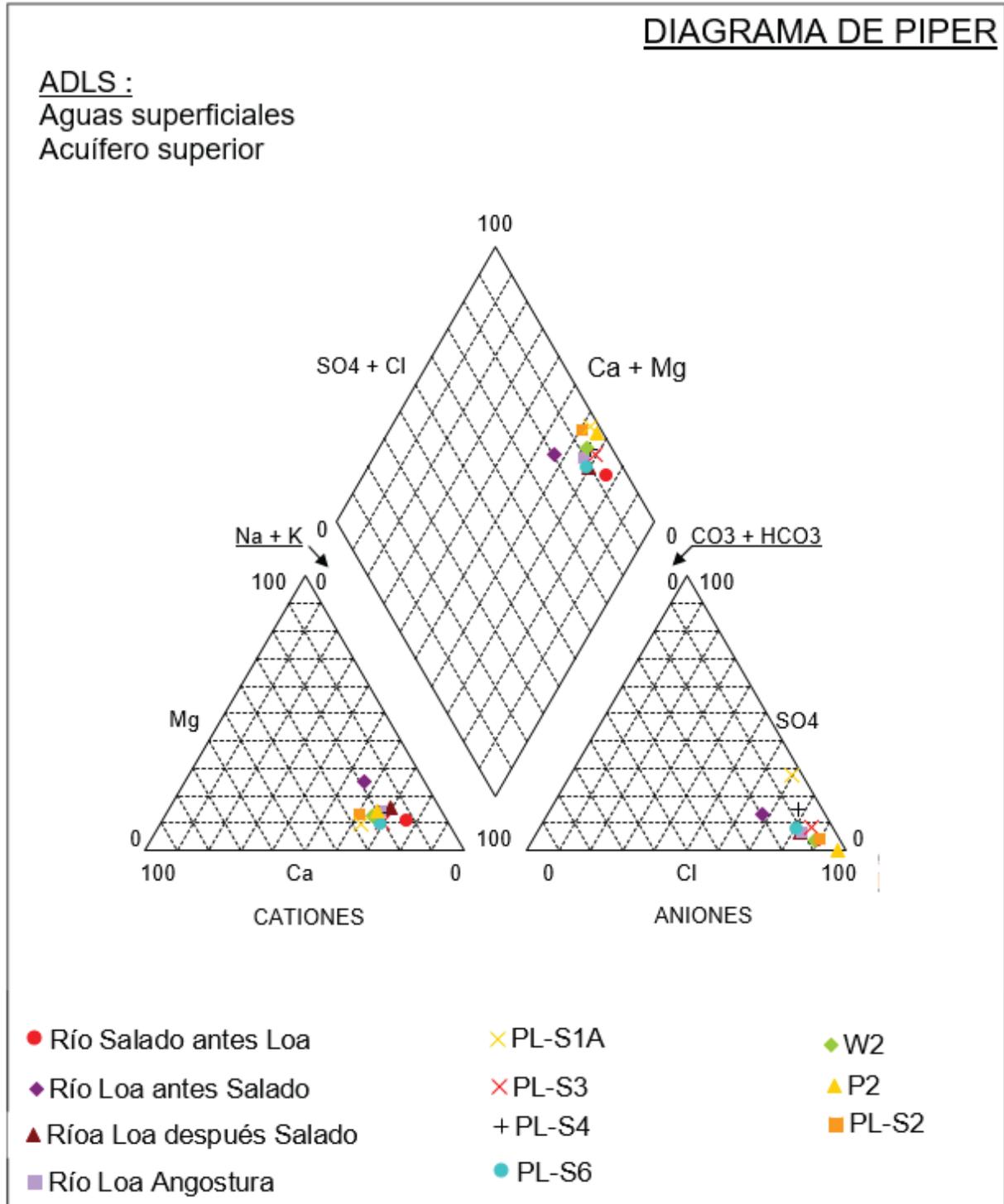


Figura 5.25: Diagrama de Piper red de pozos ADLS muestras de agua superficial y acuífero superior.

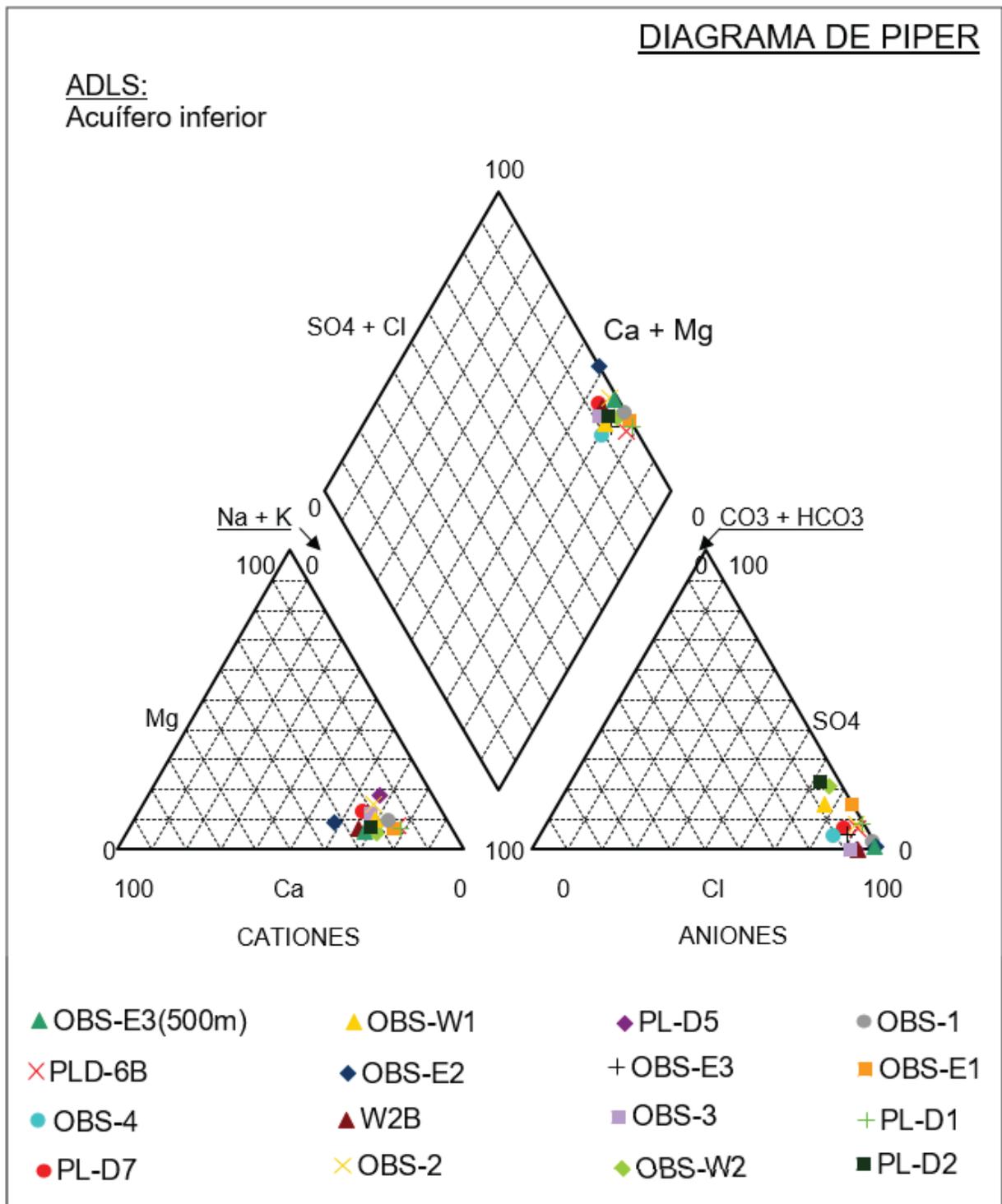


Figura 5.26: Diagrama de Piper red de pozos ADLS muestras acuífero inferior.

Tras graficar la composición química de muestras en los diagramas de Piper en las figuras 5.25 y 5.26 se observa que las aguas de la red de pozos ADLS se clasifican como cloruradas sódicas con menores diferencias composicionales entre ellas.

DIAGRAMA DE PIPER

MC:  
Acuífero Superior  
Aguas Superficiales

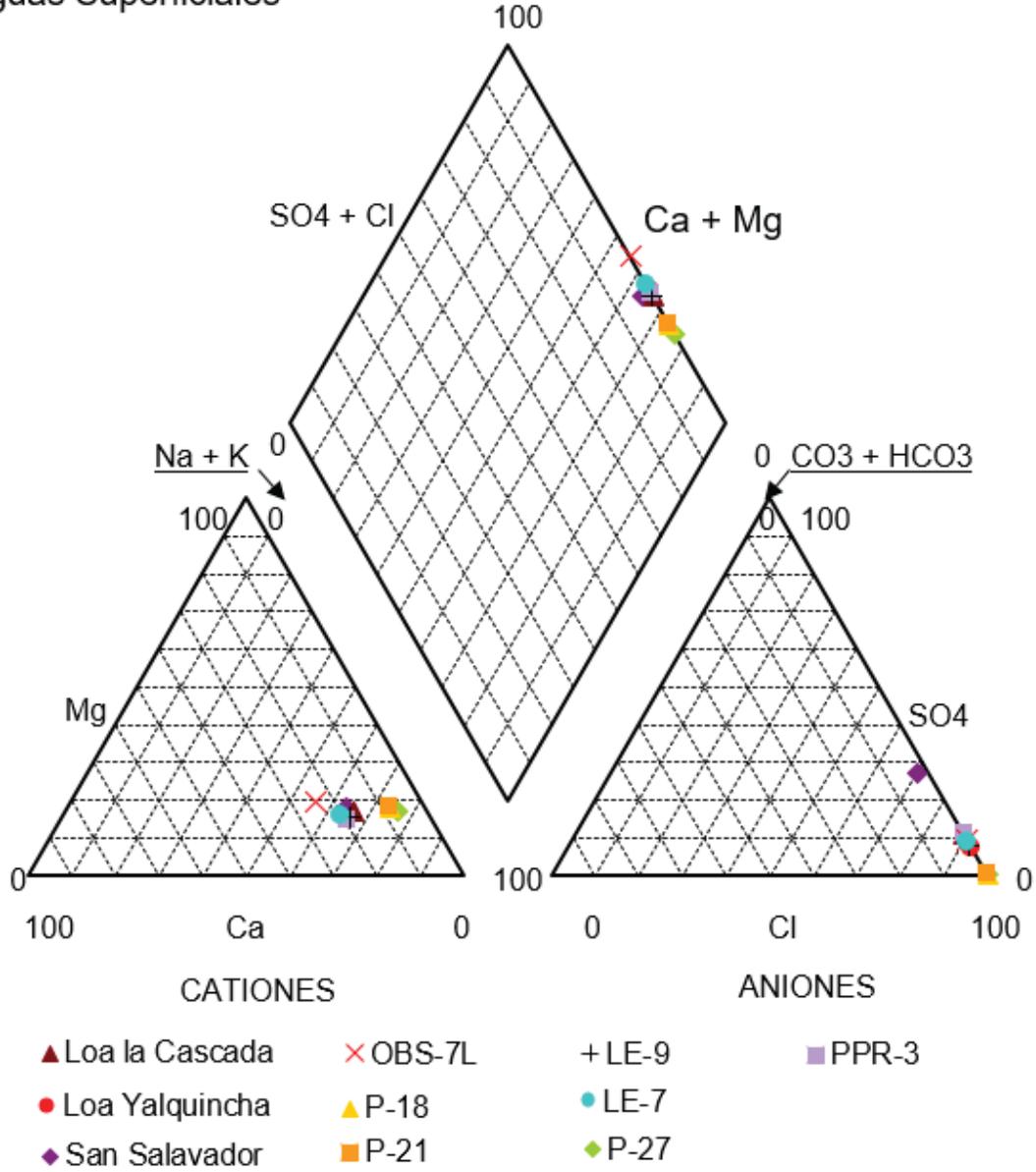


Figura 5.27: Diagrama de Piper red de pozos MC muestras aguas superficiales y acuífero superior.



## DIAGRAMA DE PIPER

DMH:  
 Acuífero superior  
 Aguas superficiales

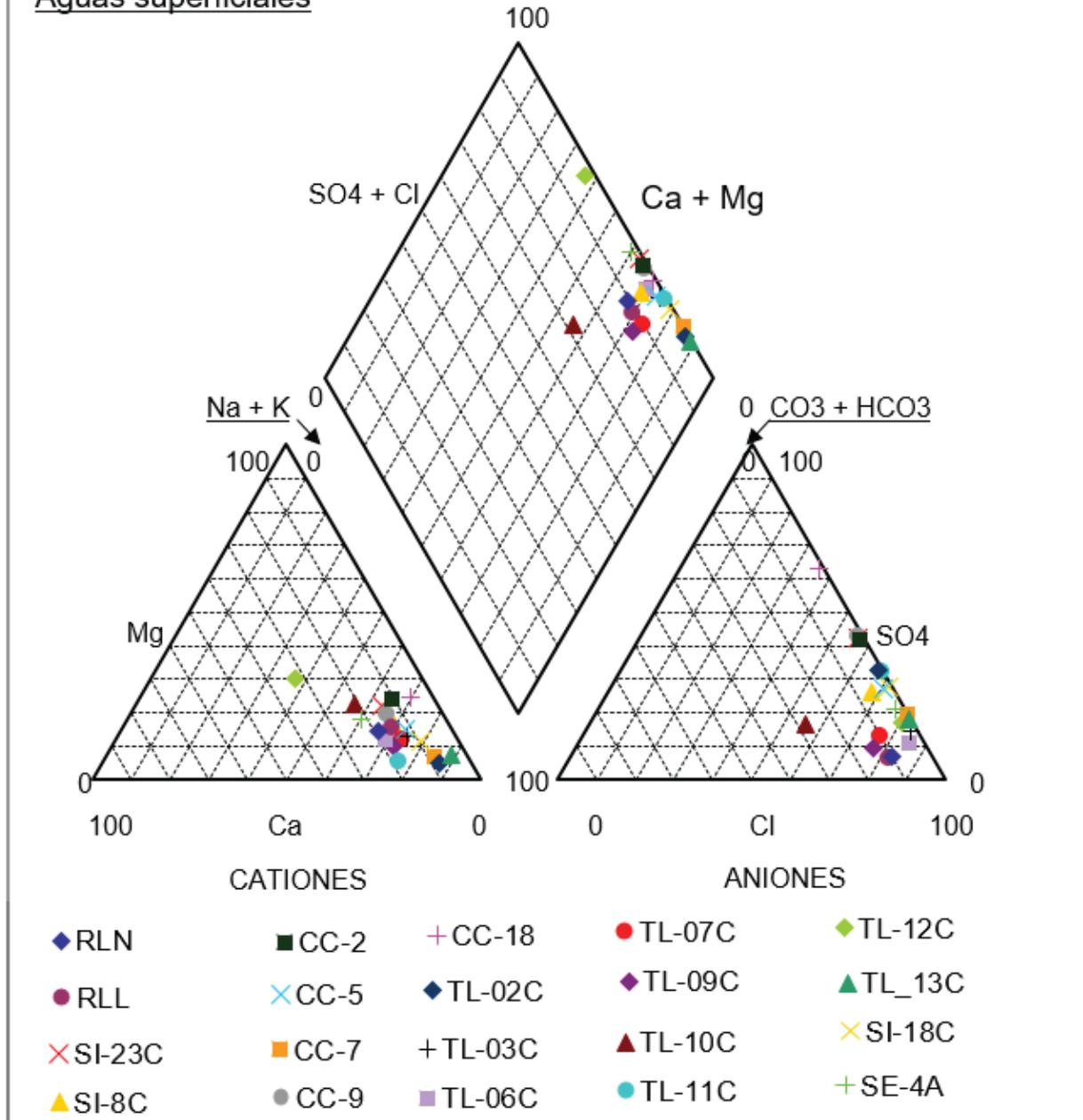


Figura 5.29: Diagrama de Piper red de pozos DMH muestras aguas superficiales y acuífero superior.

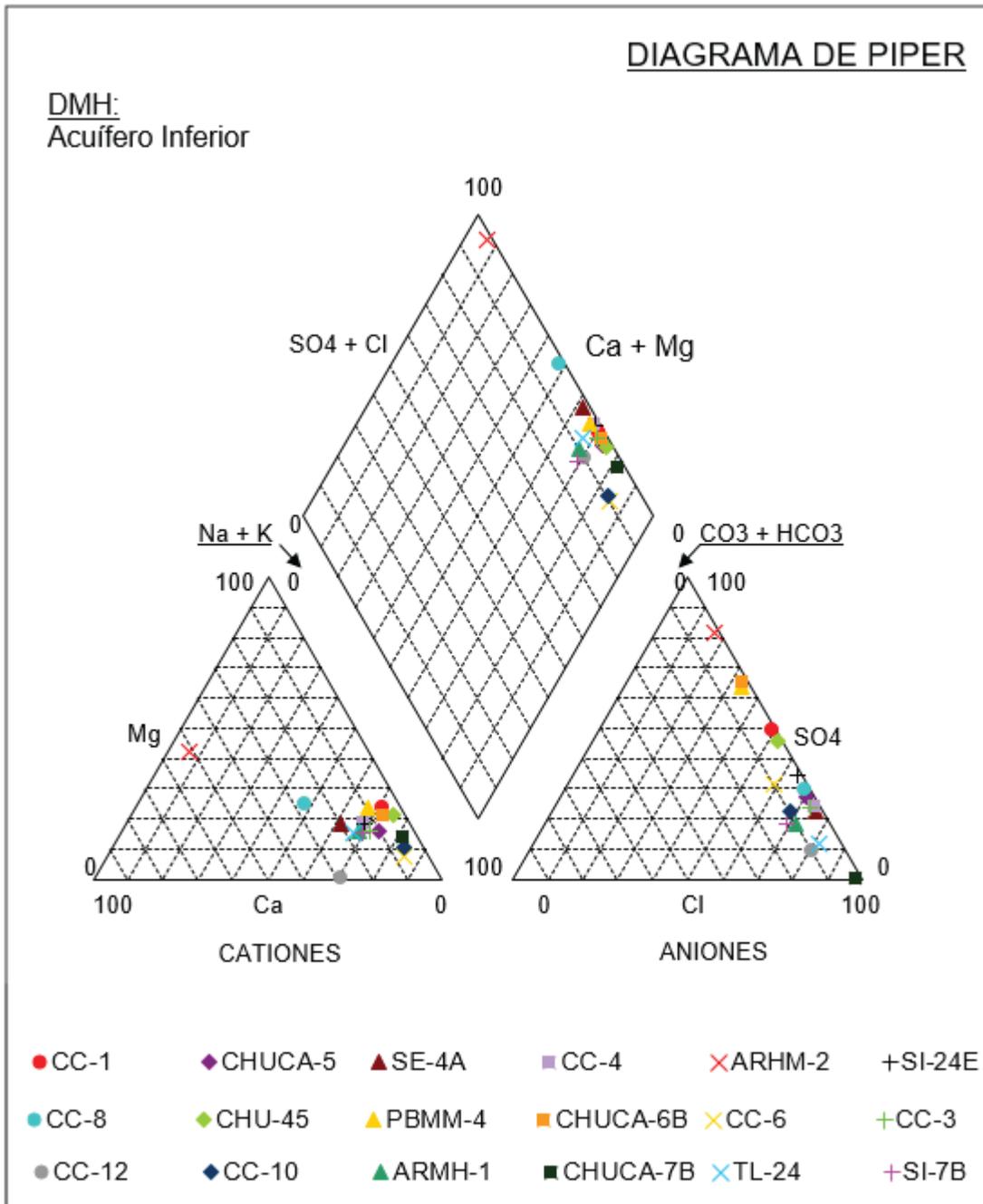


Figura 5.30: Figura 5.28: Diagrama de Piper red de pozos DMH muestras acuífero inferior.

A diferencia de las redes anteriores DMH exhibe muestras de facies químicas distintas, al observar las *figuras 5.29 y 5.30* se identifican principalmente muestras pertenecientes a la facie clorurada sódicas y menores muestras que se acercan a las cloruradas magnésicas.

## Capítulo 6: Discusiones

A continuación, se discuten los resultados obtenidos de la recopilación de información disponible sobre distribución de STD y composición isotópica relativa a los pozos habilitados en la cuenca de Calama. Esta información forma parte de campañas de monitoreo pertenecientes a EIA, PAT y campañas privadas de levantamiento de información del acuífero.

La información relevante para la discusión es la variación de las razones isotópica de  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$ , para las distintas muestras, y su respectiva variación según ubicación geográfica, superficial o subterránea. Como apoyo para así respaldar las discusiones se usa el parámetro fisicoquímico STD, concentración de *Cl, As, Ca, K, Mg, Na, Sr* y  $SO_4$ , como también de las concentraciones de metales como cobre y molibdeno.

Igualmente se hace uso de imágenes satelitales con el objetivo de representar la información recopilada. Y así relacionando la ubicación geográfica de los distintos pozos con la información de los niveles piezométricos, se definen flujos. a través de interpolación con métodos geoestadísticos sobre imágenes georreferenciadas.

### 6.1 Isótopos

Para el uso de las raisotópicas como un dato fiable y con el cual se concluye en el estudio, se analizó su confiabilidad, a través de la revisión de certificados de análisis de los distintos laboratorios que realizaron los estudios: Los distintos estudios fueron realizados en Universidad de Arizona, Amec Foster Wheeler y Laboratorio químico DCM para ADLS, MC y DMH respectivamente.

El segundo método utilizado corresponde al uso de regresiones lineales, de las cuales se obtuvo un coeficiente de determinación con su respectiva recta para las distintas muestras de ADLS, MC y DMH. Este último método estadístico de regresiones lineales sirvió para confirmar la fiabilidad de los datos, ya que, estudios han demostrado que existe una relación lineal entre las razones de Deuterio y Oxígeno a medida que el agua sufre distintos grados de evaporación (Craig, 1961).

Desde que el agua de las precipitaciones toca la superficie y luego infiltra, fluyendo a través del subsuelo cientos de kilómetros, puede estar expuesta a cambios en sus razones isotópicas. Estos cambios, pueden ser producto de la evaporación, casos particulares de interacción agua-roca y recargas internas como externas al sistema, incluida la contaminación por intervención antrópica (ver figura 4.1). Por lo que, la información que nos entrega el coeficiente de determinación y las regresiones lineales por sí solas, no son suficientes para determinar el origen de las precipitaciones, tipos de aguas o las condiciones de recarga.

Para determinar las distintas regresiones lineales se agruparon las muestras conforme al grupo de pozos al cual pertenecen, DMH, MC o ADLS. Al graficar la composición isotópica de las distintas muestras, se puede observar la covariancia entre la razón de  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$ , además de que la totalidad de las muestras se distribuyen bajo la recta meteórica regional correspondiente a las zonas orientales del altiplano, lo cual indica que son aguas que provienen de las precipitaciones en la zona y han sufrido distintos grados de evaporación. A continuación, se graficarán las distintas muestras con sus respectivas rectas de correlación.

### 6.1.1 Isótopos pozos ADLS

En la figura 6.1, se observa que la totalidad de las muestras se encuentran bajo la línea meteórica regional. A continuación, se presentan las ecuaciones de recta para las distintas regresiones lineales, además de sus respectivos coeficientes de determinación para aguas superficiales y muestras pertenecientes al acuífero superior e inferior.

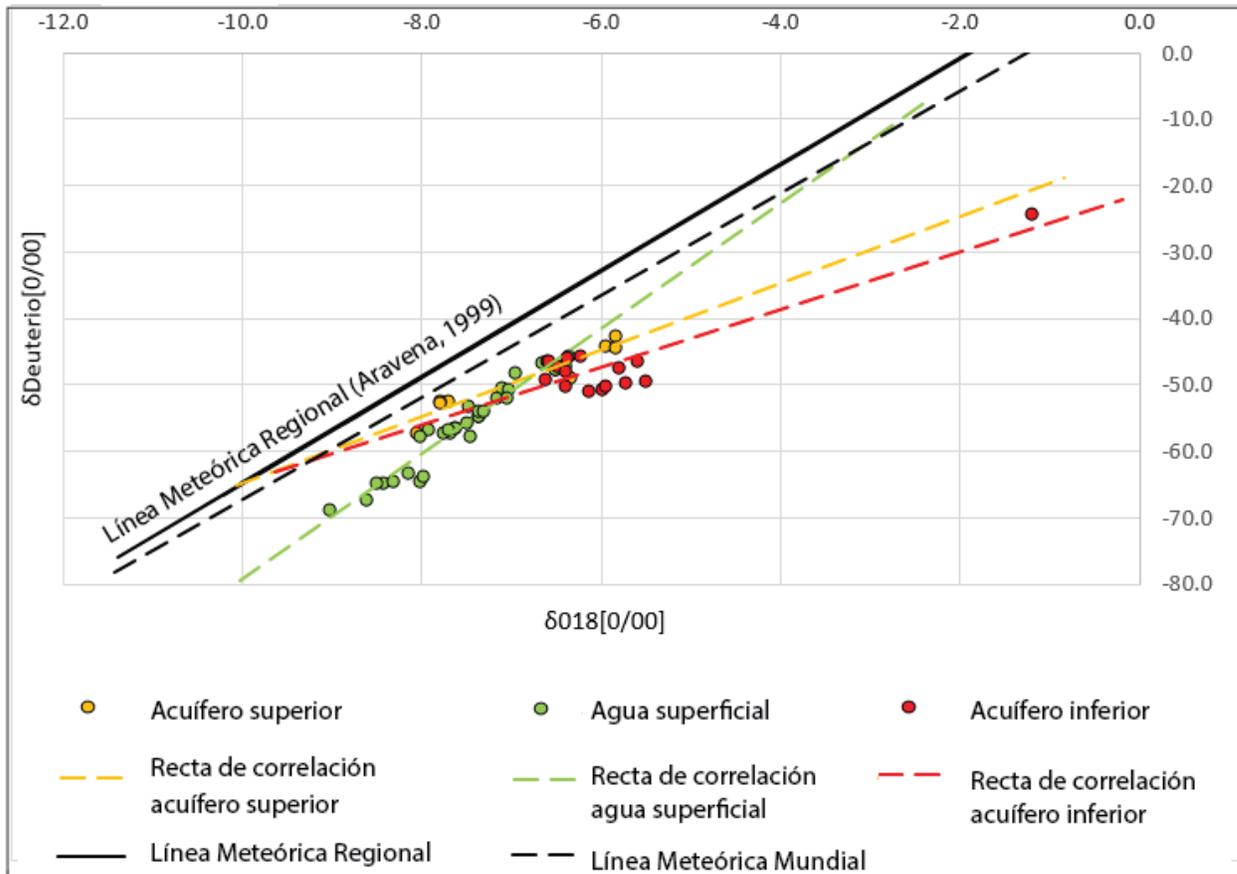


Figura 6.1: Gráfico  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$  muestras análisis isotópico sector Pampa Llalqui.

#### Superficial

$$y = 9.4157x + 14.935, R^2 = 0.9392$$

#### Acuífero superior

$$y = 5.0285x - 14.57, R^2 = 0.9225$$

#### Acuífero inferior

$$y = 4.3331x - 21.361, R^2 = 0.0443$$

### 6.1.2 Isótopos pozos Minera Centinela

En la figura 6.2, se observa las razones isotópicas de las muestras pertenecientes a la minera Centinela, estas fueron divididas por color según tipo de agua, en donde a cada grupo de puntos se le asocia una recta obtenida a través de una regresión lineal. Para el estudio de las aguas superficiales solo se consideró las muestras asociadas a ríos.

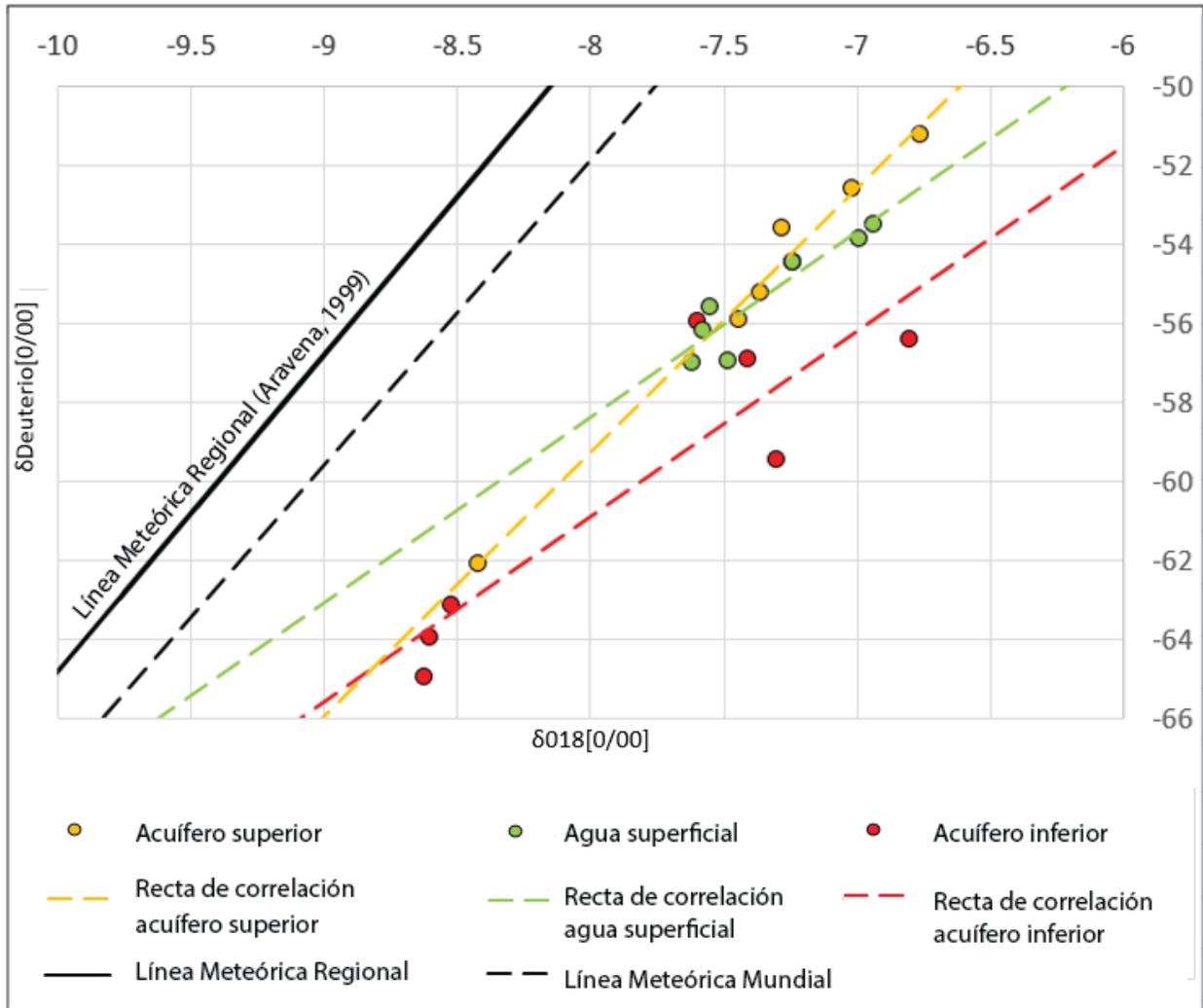


Figura 6.2: Gráfico  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$  muestras análisis isotópico red de pozos Minera Centinela.

Se presenta la ecuación de la recta y su respectivo coeficiente de determinación, para las distintas muestras del acuífero superior, inferior y aguas superficiales respectivamente.

#### Superficial

$$y = 4.8521x - 19.72, R^2 = 0.913$$

#### Acuífero Superior

$$y = 6.6758x - 5.8474, R^2 = 0.9866$$

#### Acuífero Inferior

$$y = 4.684x - 23.401, R^2 = 0.8096$$

### 6.1.3 Isótopos Pozos División Ministro Hales

En el gráfico de la *figura 6.3*, los valores extremos corresponden a muestras que fueron sacadas de pequeños lagos, vertientes, salares y aguas cercanas al Tranque Talabre, por lo que no se consideran para caracterizar isotópicamente las aguas superficiales, ya que estas no tienen una conexión directa los ríos de la zona, a pesar de esto fueron utilizadas para el cálculo de las rectas de correlación y coeficiente de determinación. Las distintas muestras fueron agrupadas por color según su tipo, además se graficó la recta meteórica regional.

Para cada tipo de muestras se calculó una recta de correlación y un coeficiente de determinación, estos serán presentados a continuación:

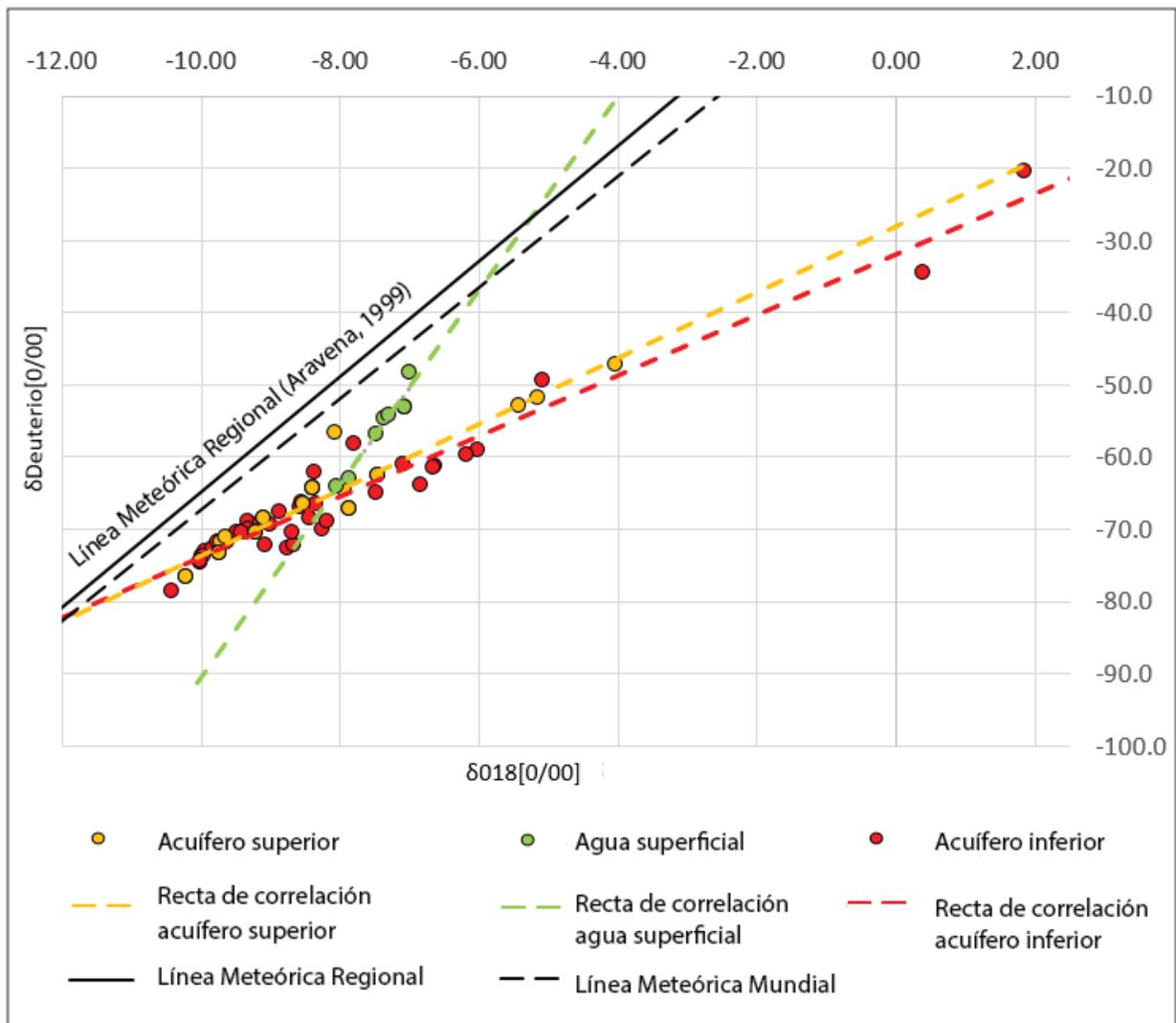


Figura 6.3: Gráfico  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$  muestras análisis isotópico red de pozos División Ministro Hales.

#### Superficiales

$$y = 4.4223x - 27.341, R^2 = 0.9542$$

#### Acuífero Superior

$$y = 4.4855x - 28.525, R^2 = 0.9392$$

#### Acuífero Inferior

$$y = 3.9074x - 34.384, R^2 = 0.9117$$

En síntesis, la totalidad de los puntos se ubican bajo la línea meteórica regional determinada por Aravena en 1999, distribuyéndose entorno a rectas obtenidas a partir de las regresiones lineales. Estas rectas corresponden a rectas de evaporación. Esto ocurre, siempre que hablemos de aguas superficiales de origen idéntico, y que además hayan sufrido distintos grados de evaporación.

Es posible observar, que casi la totalidad de los grupos obtuvieron buenos coeficientes de determinación, cercanos a la unidad, lo que comprobaría la confiabilidad de los datos según lo expuesto anteriormente. No obstante, hubo casos en que los coeficientes fueron deficientes, tales casos corresponden a las aguas superficiales de Pampa Llalqui, así como también, a los acuíferos inferiores pertenecientes a la cuenca de Calama:

- Las muestras pertenecientes al acuífero inferior no alteran su composición isotópica producto de la evaporación, sino como resultado de la mezcla de distintos flujos o por infiltración desde las unidades que los sobreyacen, lo que trae como consecuencia coeficientes de correlación deficientes. Por lo que sus razones no graficarán en torno a una recta, sino que en grupos de determinadas razones isotópicas.
- Por su parte, las aguas superficiales de Pampa Llalqui, a pesar de sufrir cierto grado de evaporación estas presentan coeficientes bajos de determinación, producto del origen distinto de las aguas, estas pertenecientes a los ríos Loa y Salado.

Finalmente es necesario destacar las relaciones que se observan en las redes de pozos ADLS y DMH para el acuífero superior e inferior, ya que en las *figuras 6.1 y 6.3* las rectas de evaporación presentan pendientes semejantes siguiendo así las muestras gradientes similares. Esto podría asociarse a una conexión hidráulica en ambos casos, como también un origen común de las aguas de los acuíferos superior e inferior, previo al cambio a las razones isotópicas que caracterizan a cada acuífero. Ambas situaciones podrían combinarse en distinta medida según la zona en la que se realice el análisis.

## **6.2 Flujos por revisión de piezometría y comportamiento en la distribución de niveles**

La dirección del flujo de agua subterránea y la piezometría de la mayor parte de la cuenca de Calama ha sido interpretada a partir de registros y la distribución de los niveles piezométricos, obtenido de un total de 75 pozos habilitados en el acuífero superior y 80 pozos habilitados en el acuífero inferior.

Con el propósito de detectar la presencia de determinados flujos de agua en el sistema subterráneo se realizó un Kriging. Esta herramienta de análisis geoestadístico, utiliza los niveles piezométricos de las distintas redes de pozos con el fin de interpolar curvas equipotenciales. Así, para un conjunto de niveles piezométricos del acuífero inferior y superior se generaron distintas isopiezas cada 10 metros de variación.

Cabe mencionar que, las isopiezas nos permiten conocer el sentido del flujo, el cual es perpendicular a la recta tangencial a estas.

### **6.2.1 Acuífero inferior**

La descripción de flujos en el acuífero inferior se obtuvo a partir de la interpretación de las isopiezas observadas en la *figura 6.4*, esta interpretación fue reforzada a través del uso de información piezométrica asociada a distintos puntos en la cuenca, como también a cambios en las isopiezas producto de estructuras descritas previamente por (Jordan et al., 2015),(VAI, 2012) y (VAI,2016).

Así pues, para el acuífero inferior es posible identificar 3 posibles direcciones de flujo, influenciadas en gran medida por controles estructurales asociados a posibles fallas o y componentes de flujo provenientes desde otras direcciones:

- El flujo 1 (flecha roja) y principal corresponde a un flujo de carácter regional proveniente desde el Norte, más o menos paralelo al río Loa y posteriormente comienza a rotar en dirección NE-SW a la altura de la confluencia del río Loa con el Salado con la apertura de la cuenca, que se abre principalmente hacia el W.
- El segundo flujo (flecha amarilla), corresponde a flujo regional del Tatio, el cual proviene en dirección NE-SW que al aproximarse al centro de la cuenca de Pampa Llalqui comienza a variar radialmente hasta alcanzar una dirección NW-SE producto del control estructural. Hacia el límite oeste de la cuenca el flujo se horizontaliza para alcanzar una dirección E-W aproximada para finalmente variar su dirección hacia SE sorteando de cierta forma la ciudad de Calama.
- Finalmente, el flujo 3 (flecha naranja) se observa a la altura de la confluencia de los ríos Salado y Loa, se observa un flujo en dirección NE-SW que luego se horizontaliza incorporándose al flujo E-W de Llalqui para seguir paralelo al río Loa en la zona de Angostura.

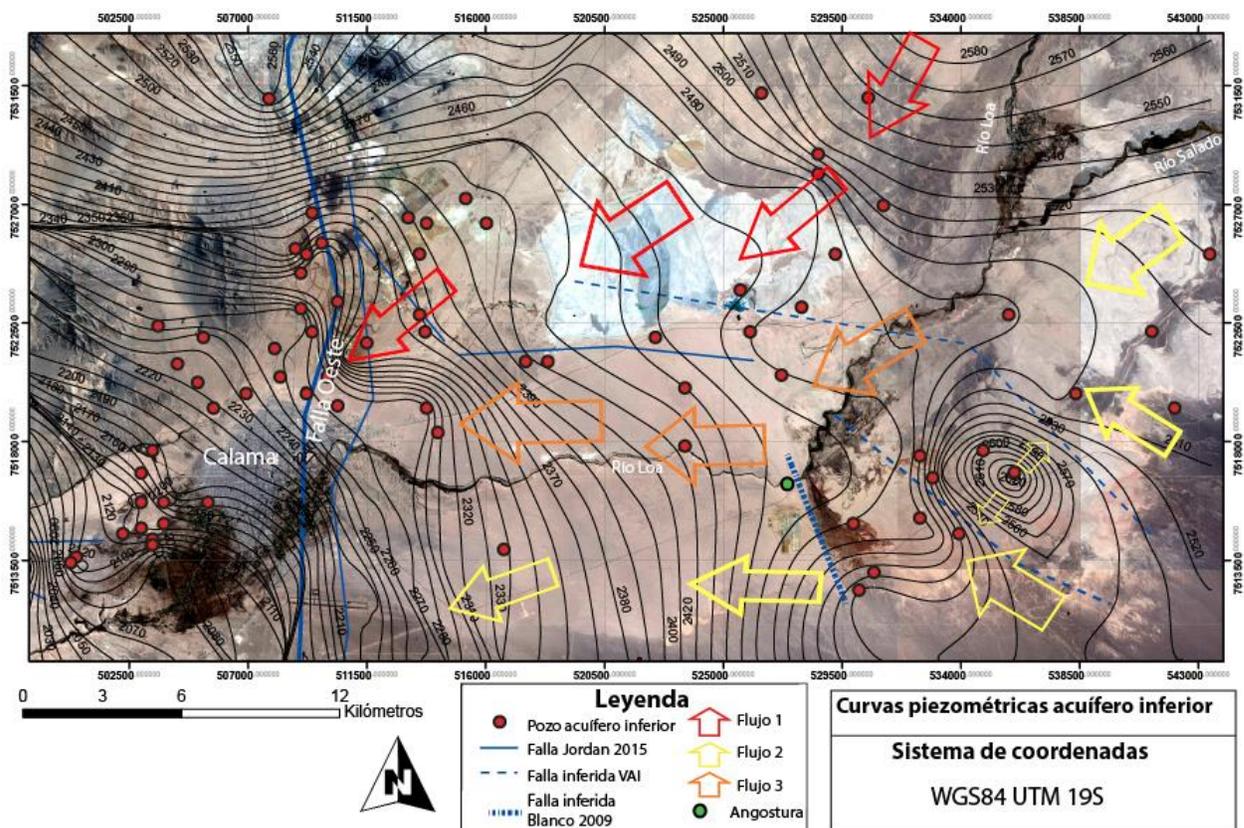


Figura 6.4: Mapa de flujo según interpretación de isopiezas, obtenidas a partir de los niveles piezométricos del acuífero inferior.

En la figura 6.4 se observa que existen fallas, las cuales tienen una fuerte incidencia en el cambio abrupto niveles piezométricos. Estos cambios se observan a través de la proximidad las isopiezas y la generación de campos con altos y bajos niveles piezométricos. Los cuáles serán cruciales para determinar la dirección de los flujos tanto de manera regional como local.

Se observan cambios importantes asociados a 7 estructuras. Tres de las estructuras se encuentran en Pampa Llalqui con dirección NW-SE aproximada, las cuales generan un cambio abrupto en los niveles piezométricos y la dirección del flujo 2. También existe una falla inferida por blanco la cual actúa como barrera hidráulica para parte del flujo 2, yuxtaponiendo unidades de permeabilidades muy distintas, provocando la descarga del acuífero inferior en el superior.

La cuarta estructura corresponde a la Falla Oeste de dirección N-S aproximada, la cual es capaz de afectar la piezometría de los pozos MC y DMH debido a su carácter regional. La Falla Oeste al igual que las fallas/barreras la zona sur de Pampa Llalqui ponen fin a las unidades que transportan al acuífero inferior producto del levantamiento del subsuelo el cual provoca el ascenso de las aguas y su posterior descarga de estas en el acuífero superior.

La quinta y sexta estructura corresponden al monoclinal de Chiu-Chiu y sinclinal del Salado los cuales tienen una gran participación en direccionar el flujo 3 como también de determinar la ubicación de la parte baja del río Salado y los alcances del río Loa. Los efectos de la disolución de las distintas unidades junto al fracturamiento, lo cual ha aumentado la permeabilidad y mejorado las propiedades hidráulicas que facilitan en flujo de las aguas subterráneas, direccionando así el flujo 3 por dichos canales (Jordan et al., 2015).

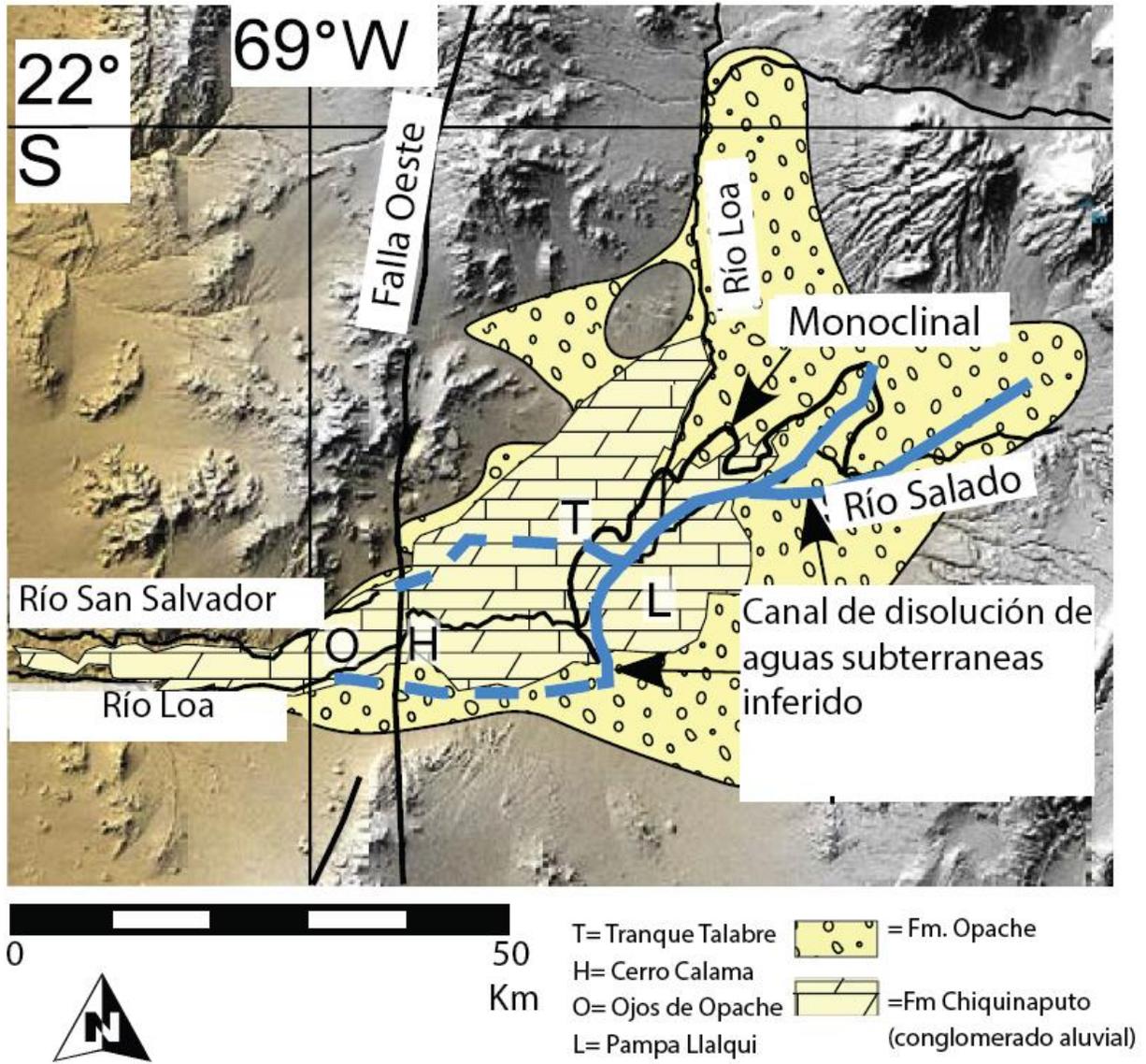


Figura 6.5: Representación del Canal de disolución de aguas subterráneas inferido producto del Monoclinal de Chiu-Chiu y Sinclinal del río Salado. (Modificado de Jordan, 2015).

Finalmente, la sexta estructura corresponde a un set de fallas de menor escala ubicadas al oeste de Calama, por tratarse del límite de la zona de estudio no se detallará su influencia en los niveles piezométricos.

## 6.2.2 Acuífero superior

La descripción de flujos en el acuífero superior se obtuvo a partir de la interpretación de las isopiezas observadas en la *figura 6.6*. Al igual que en acuífero inferior esta interpretación fue reforzada a través del uso de información piezométrica y cambios en las isopiezas producto de estructuras descritas previamente por (Jordan et al., 2015),(VAI, 2012) y (VAI,2016).

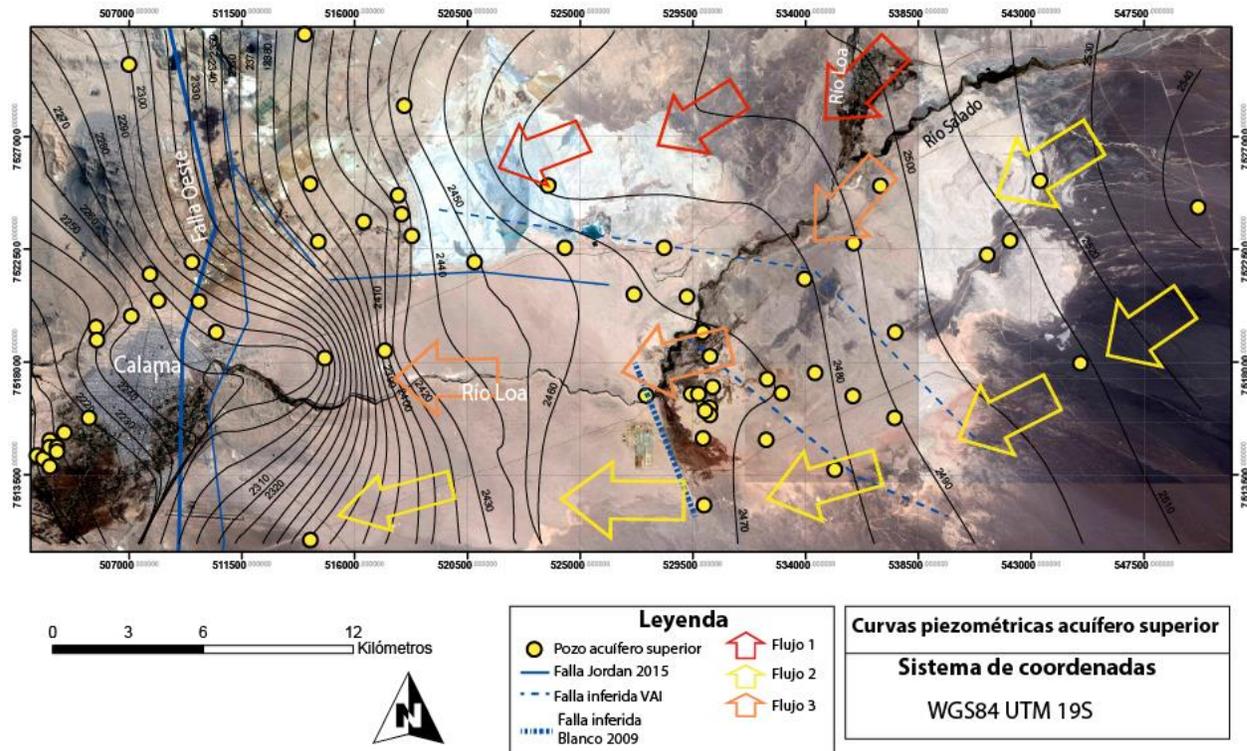


Figura 6.6: Mapa de flujo según interpretación de isopiezas, obtenidas a partir de los niveles piezométricos del acuífero superior.

Al observar la figura 6.6, se identifican 3 posibles direcciones de flujo, similares a los descritos anteriormente:

- El flujo 1 y principal corresponde a un flujo de carácter regional proveniente desde el Norte, más o menos paralelo al río Loa y posteriormente comienza a rotar en dirección NE-SW a la altura de Chiu-Chiu. Se asume que su comportamiento en la zona norte de la cuenca es similar al flujo del acuífero inferior ya que no se cuenta con información piezométrica del límite norte de la cuenca.
- El segundo flujo, corresponde a flujo regional del Tatio, el cual proviene en dirección NE-SW que al aproximarse al centro de la cuenca de Pampa Llalqui comienza a variar radialmente hasta alcanzar una dirección NW-SE. Hacia el límite oeste de la cuenca el flujo se horizontaliza para alcanzar una dirección E-W aproximada.
- Finalmente, el flujo 3 se observa a la altura de la confluencia de los ríos Salado y Loa, se observa un flujo en dirección NE-SW que luego se horizontaliza incorporándose al flujo E-W de Llalqui para seguir paralelo al río Loa en la zona de angostura.

En la figura 6.6, se observa que los flujos interpretados a partir de las isopiezas parecen estar influenciados en menor medida por las estructuras, debido a que no se observan grandes variaciones ni cambios drásticos de dirección.

Aquí nuevamente los pliegues sinclinal y monoclinial tendrán efectos sobre la dirección del flujo 3, al igual que la presencia de canales alargados de permeabilidades excepcionalmente elevadas en el acuífero superior, en las cercanías del cerro Calama.(Fuentes, 2009).

### 6.3 Caracterización de composición isotópica de los flujos regionales

A continuación, se caracteriza isotópicamente los flujos identificados en el punto 6.2, estos corresponden al flujo 1,2 y 3. Las distintas muestras presentarán razones isotópicas que revelarán la participación de los flujos en distintas razones.

Para dicha caracterización fue necesario el uso de datos que se encontraban lejanos a la zona de estudio (ver *figura 6.7*), por lo que se utilizó información proveniente de distintos autores (Aravena, 1999 y Rüttger, información personal verbal). Los datos analizados corresponden a muestras de agua superficial, las cuales tienen carácter naciente, donde sus cauces son originadas en vertientes, por lo cual tienen relación con los flujos de aguas subterráneas (DGA, 1980).

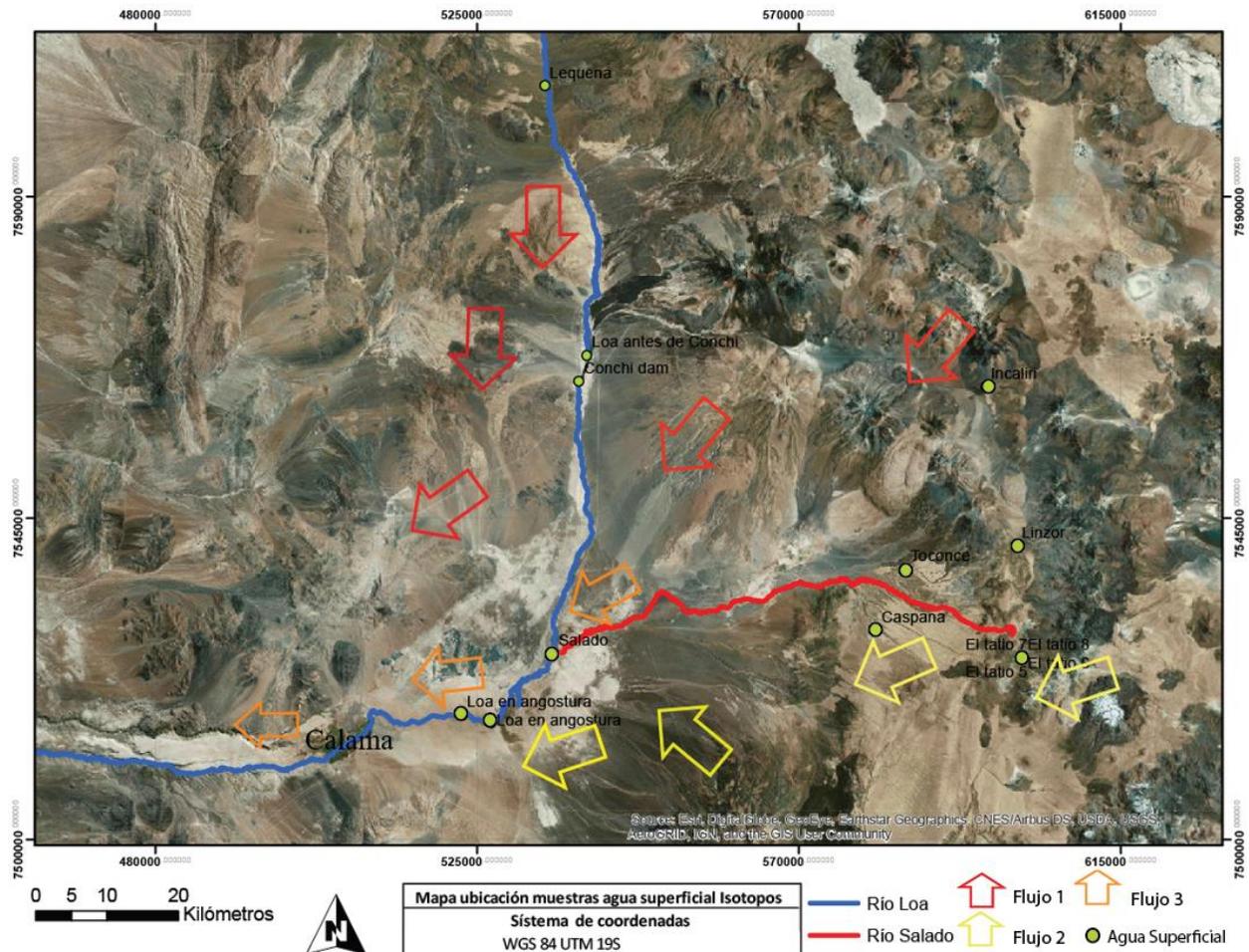


Figura 6.7: Ubicación de muestras agua superficial usadas en caracterización isotópica de flujos 1, 2 y 3.

Al graficar la composición isotópica de las distintas muestras en un gráfico  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2dH$  se observa que las muestras siguen tendencias definidas por los flujos del noreste y Tatio, y una mezcla de estos dos, en distintas proporciones. Por lo cual se definieron 5 grupos como se observa en gráfico de la figura 6.8:

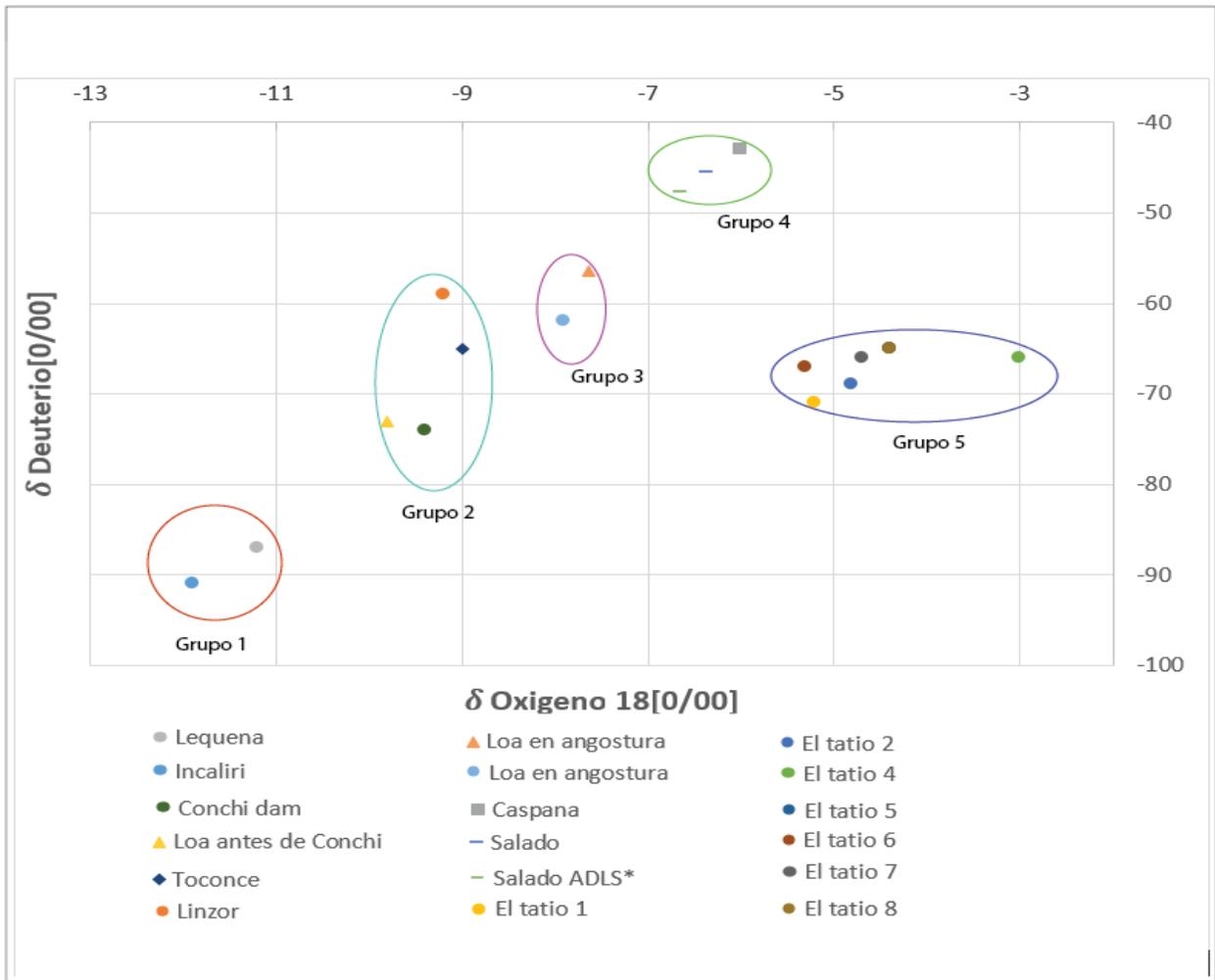


Figura 6.8: Gráfico  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$  razón isotópica muestras de agua superficial asociadas a flujos regionales. La muestra "Salado ADLS\*" corresponde a un promedio de 7 muestras.

- Grupo 1: Corresponde a las muestras Lequena e Incaliri. Ambas muestras exhiben valores variables en un rango de -11.9 a -11.2, y entre -91 y -87 para el  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  respectivamente. Estas muestras corresponden a las más livianas dentro de la cuenca y se encuentran empobrecidas en relación a las demás muestras, ya que provienen de partes altas de la cordillera donde su razón isotópica no ha sido modificada producto de la evaporación o mezcla con aguas subterráneas.
- Grupo 2: Compuesto por las muestras Conchi dam, Loa antes de Conchi, Toconce y Linzor. En el gráfico 15, las muestras presentan valores varían entre -9.6 a -9 para  $\delta^{18}O$  y -73 a -59 para  $\delta^2H$ . Las muestras de este grupo muestran valores algo más enriquecidos producto de la evaporación y la contaminación del agua superficial con flujos de aguas subterráneas.

- Grupo 3: Compuesto por dos muestras de agua superficiales del río Loa en angostura, estas presentan razones isotópicas intermedias, con valores isotópicos que varían entre 8.0 a -7.5 para  $\delta^{18}O$  y -63 a -55.9 para  $\delta^2H$ . Los valores de su razón isotópica se asocian al flujo 3.
- Grupo 4: El grupo 4, está conformado por muestras de razones isotópicas más pesadas en relación al grupo 3, que corresponden a Caspana, Salado y Salado ADLS. Sus razones muestran valores variables entre -6.7 y -6 para el  $\delta^{18}O$  y en un rango entre -47.6 y -43 para el  $\delta^2H$ . Estas muestras se encuentran relacionadas directamente con el flujo 2, ya que las aguas del río Salado tienen su origen en 30 vertientes termales y frías a los pies de la cadena del volcán del Tatio (DGA, 1980).
- Grupo 5: Conformado por muestras extraídas directamente de los Geiser del Tatio con un promedio de razones isotópicas de -4.5 para  $\delta^{18}O$  y -67 para  $\delta^2H$ , ambas razones también relacionadas con el flujo 2, su composición más pesada se asocia a una mayor influencia de aguas provenientes del sistema del Tatio, lugar donde su composición isotópica se ve influenciada producto de procesos geotermales.

Al igual que en el área de estudio la dirección de los flujos también se encuentra determinada por posibles estructuras o controles estructurales, los cuales actúan como barrera hidráulica y evitan una mayor mezcla de los flujos 1 y 2.

Estas barreras fueron inferidas a partir de la diferencia en las razones isotópicas de Toconce y Caspana. Que, a pesar de encontrarse geográficamente a alturas similares en la cuenca, estas presentan razones muy distintas.

Los ríos Caspana y Toconce, ambos se originan en vertientes, siendo posible presumir la existencia de una barrera hidráulica a la altura del río Salado, que provocaría el cambio de dirección de los flujos subterráneos y su interrupción. Lo anterior causaría su descarga en la superficie dando origen estos ríos tributarios.

#### **6.4 Razón isotópica según influencia de flujos**

En el capítulo 5, se graficaron las razones isotópicas de manera independiente para las 3 zonas de estudio, luego dentro de estos mismos grupos las muestras fueron clasificadas según rangos de razones isotópicas.

Como patrón general en los gráficos de las *figuras 6.8 y 6.14*, se observa que las muestras del acuífero superior se agrupan junto a las muestras del acuífero inferior se propone que ambos acuíferos son alimentados por el mismo flujo, además de existir debilitamiento del acuitardo en determinadas zonas, lo que podría permitir una transferencia de la carga hidráulica entre el acuífero superior e inferior.

Las muestras del acuífero inferior también se agruparán en determinados rangos según el valor de las razones isotópicas, formando así grupos independientes, que su vez también puede presentar muestras del acuífero superior como también muestras de agua superficial. Dichas anomalías se pueden explicar por:

- La presencia de estructuras capaces de descargar acuífero inferior en el superior generando distintos grados de conexión hidráulica.
- Mezcla de los flujos en distintas razones, lo que determina la composición isotópica final de las muestras.

Al observar los gráficos de las *figuras 6.8, 6.11 y 6.14* queda en evidencia que el acuífero en la zona de Pampa Llalqui tiene una conceptualización más compleja que la del acuífero en el resto de la cuenca de Calama.

A continuación, se realiza un estudio independiente para cada zona, con el fin de caracterizar isotópicamente los acuíferos y aguas superficiales. Y así demostrar las distintas fuentes de recarga del acuífero en función de su ubicación en la cuenca.

### 6.4.1 Red de pozos ADLS

Como se puede apreciar en el gráfico de la *figura 6.9*, en el sector de Pampa Llalqui se pueden determinar 4 grupos según rangos de composición isotópica. De los cuales 3, serán cruciales para caracterizar isotópicamente los acuíferos y sus principales flujos encargados de recargarlos.

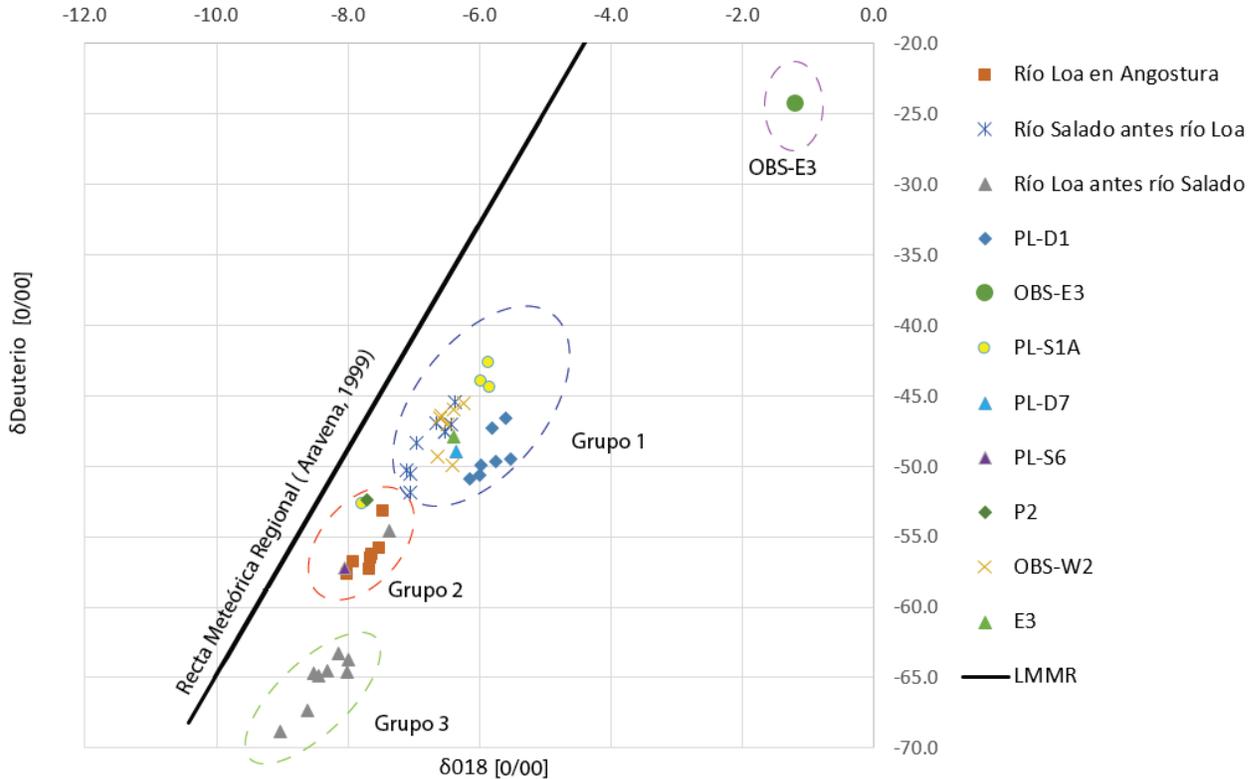


Figura 6.9: Gráfico  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$  composición isotópica de muestras red de pozos ADLS.

- El campo lila corresponde a una muestra extraída del pozo OBS-E3, donde la razón su razón isotópica se encuentra muy alejada de las demás muestras, por lo que no se vincula a ninguna de las razones asociadas a los diferentes flujos. Su razón isotópica es más pesada en relación a las demás muestras, esto se debe probablemente a que la muestra fue extraída a una profundidad de 500 metros, donde los flujos que caracterizan a la muestra tienen un comportamiento distinto.
- El grupo 1 corresponde a muestras pertenecientes al río Salado y al acuífero superior e inferior.
- Por su parte, el grupo 2 se encuentra conformado por muestras pertenecientes al río Loa después de la confluencia con el río Salado.
- Finalmente, el grupo 3 corresponde a muestras pertenecientes al río Loa antes de su confluencia con el río Salado.

Si observamos la *figura 6.10* se aprecia los tres flujos descritos previamente, los acuíferos tienen una composición isotópica determinada por sus fuentes de recarga, producto de esto, el acuífero inferior muestra una composición asociada al flujo 2, respaldado por su composición isotópica y química. Por su parte el acuífero superior muestra un comportamiento mixto entre aguas del flujo 1 y 3, con una mayor influencia y participación del flujo 3.

Las muestras del acuífero superior que presenten razones isotópicas asociadas al acuífero inferior será producto del control estructural que existe en Pampa Llalqui, donde las estructuras cumplen la función de conexión hidráulica entre los acuíferos. Las fallas son las encargadas de interrumpir el flujo del acuífero inferior a través de la yuxtaposición de unidades de muy distinta permeabilidad, provocando una especie de barrera hidráulica como se observa en la *figura 6.11*, lo que produce la descarga del acuífero inferior en el superior, así cambiando su composición original. Las fallas tienen también un control estructural sobre la cuenca, ya que provocan el acuñaamiento de los materiales finos del acuitardo, lo que facilita la conexión hidráulica entre el acuífero superior e inferior a medida que se avanza al límite oeste de la cuenca. La única muestra que refleja la original composición del acuífero superior en Pampa Llalqui corresponde al pozo PL-S6.

Las aguas superficiales se asocian a los distintos flujos según su ubicación en la cuenca. Aguas arriba del río Loa antes de su confluencia con el río Salado se asocia al flujo 1, después de su confluencia con el río Salado, en la zona de angostura su composición se asocia principalmente al flujo 3, ya que las razones isotópicas estarán determinadas producto de la descarga del acuífero superior en el río Loa (Jordan et al., 2015). Las aguas del río Salado, antes de su confluencia con el río Loa se asocian al flujo 2.

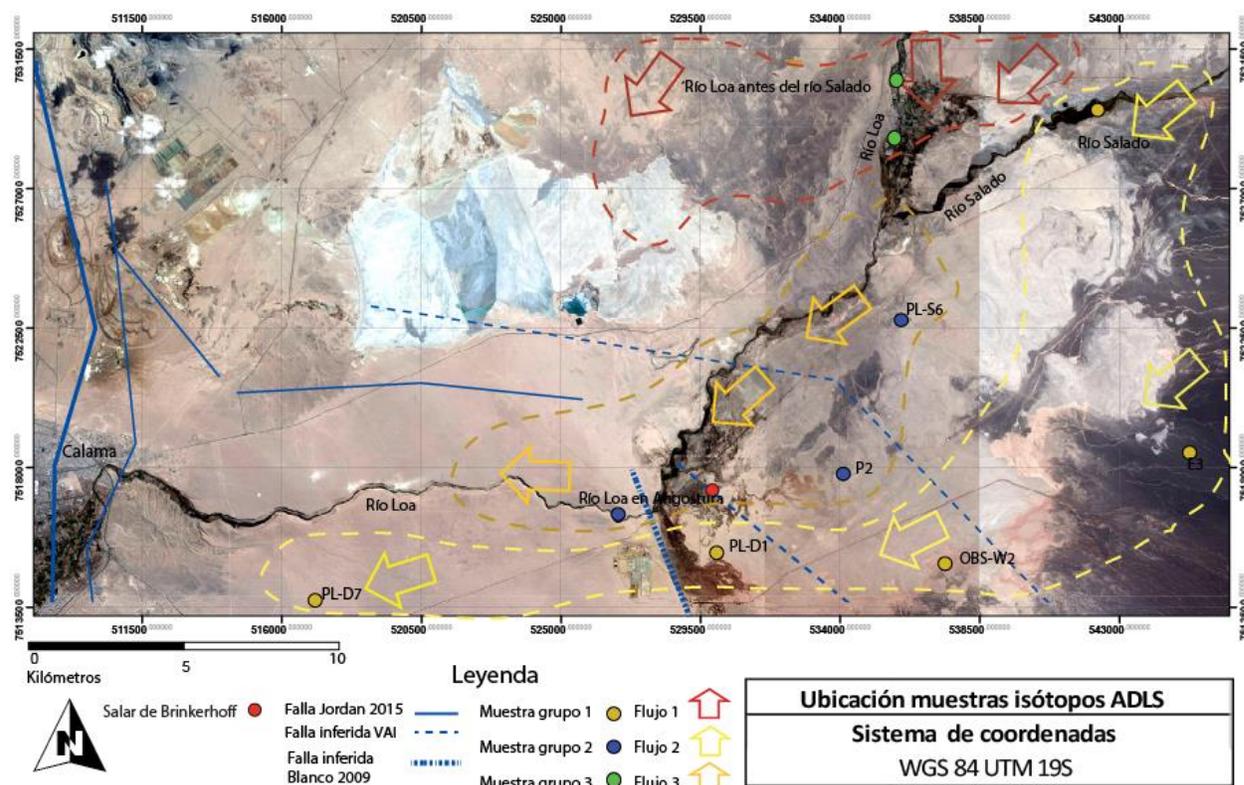


Figura 6.10: Flujos encargados de la recarga del Sistema de acuíferos en la cuenca del Loa medio.

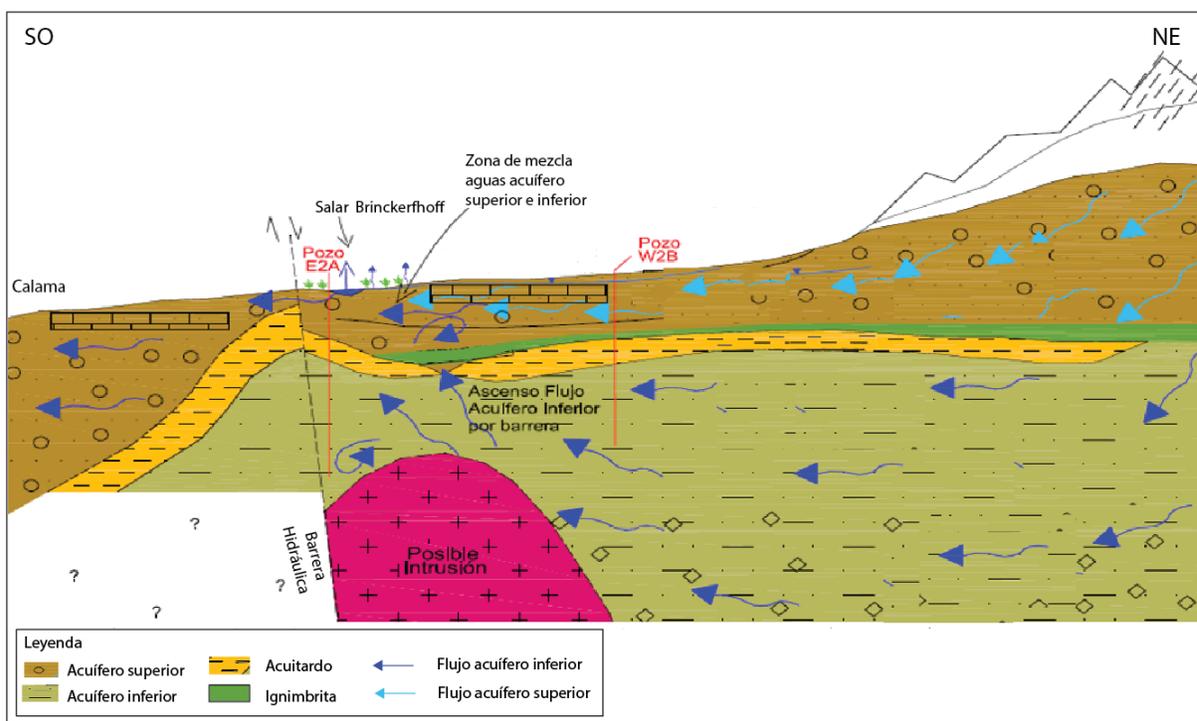


Figura 6.11: Conceptualización de la descarga del acuífero inferior en el superior (modificado de Vai, 2013).

#### 6.4.2 Red de pozos Minera Centinela

Es importante destacar, que los pozos de minera Centinela están limitados a un sector más acotado que los pozos de DMH y ADLS.

Como se puede apreciar en el gráfico de la figura 6.12, en el sector de MC se pueden determinar 2 grupos según rangos de sus razones isotópicas. Los cuales caracterizan desde el punto de vista isotópico los distintos acuíferos y sus principales flujos encargados de recargarlos.

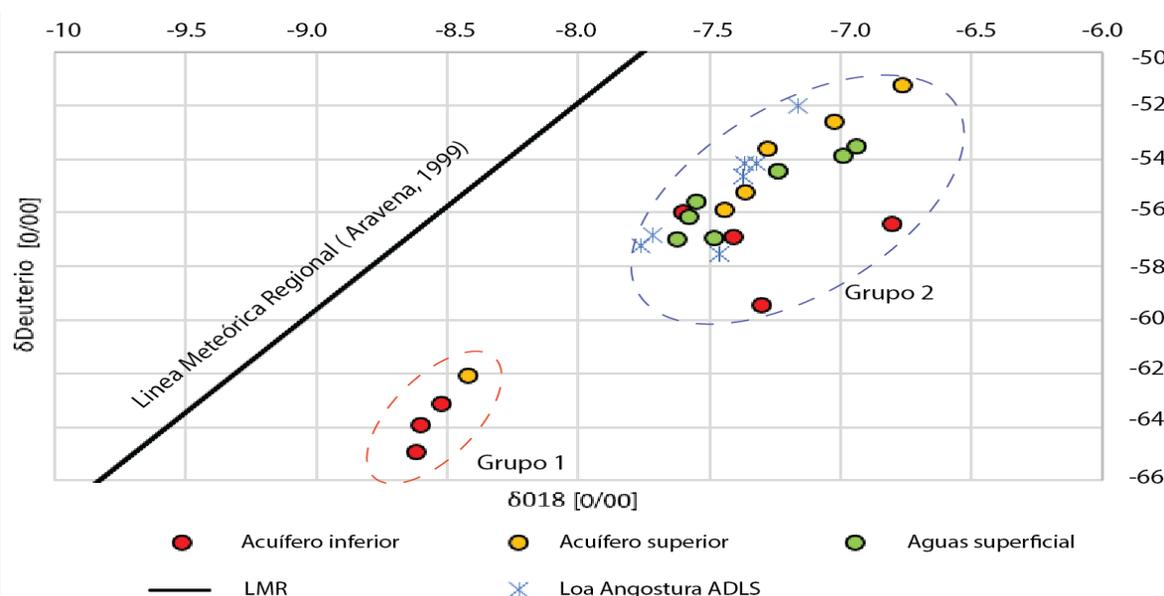


Figura 6.12: Gráfico  $\delta^{18}\text{O}$  vs  $\delta^2\text{H}$  razón isotópica muestras red de pozos minera Centinela.

El grupo 1 está compuesto por tres muestras del acuífero inferior y una del acuífero superior. Por su parte, en el grupo 2 se observan muestras del acuífero superior e inferior como también muestras de aguas superficiales.

En cuanto al grupo 2, las muestras de agua superficial presentan razones isotópicas variables de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , estas varían en rangos de -7.62 hasta -6.94 y -53.52 a -56.99 respectivamente, similares a las muestras del Río Loa en Angostura. Esta composición indicaría una mayor influencia por parte del flujo Central y el flujo regional Noreste.

Así mismo las aguas del acuífero superior pertenecientes al grupo 2, presentan una composición bastante similar a las aguas superficiales, producto de la conexión hidráulica que existe entre el acuífero superior y las aguas superficiales (Minera El Tesoro, 2010). En el área de MC las aguas pertenecientes al acuífero superior provienen principalmente del flujo central (*figura 6.13*). También es importante considerar la influencia del descenso topográfico abrupto en la zona, determinante para la generación de cambios de las razones isotópicas en las aguas superficiales. Ya que lo anterior, propicia que las aguas del acuífero superior surjan hacia la superficie en diversas vertientes (Jordan, et al. 2015). Así mismo, debido al aumento de la incisión del río, se produce la descarga del acuífero superior en el río Loa. Por lo que, sus razones isotópicas serán muy similares entre sí, situación que se ve respaldada al comparar la cantidad de sólidos totales disueltos, elementos mayores y menores, y Arsénico en la mayoría de las muestras.

En cuanto a las aguas pertenecientes al acuífero inferior, es posible observar en el gráfico de la *figura 6.12*, muestras pertenecientes, tanto al grupo 1 como al grupo 2. Esto se podría atribuir a dos posibles razones:

- Una primera posible causa de este fenómeno se debe a que, en la zona de Calama, a diferencia de lo que ocurre en parte central de la cuenca y en Pampa Llalqui el nivel del acuífero superior está por sobre el nivel del acuífero inferior. Lo anterior, contribuye a una transferencia vertical (DGA, 2013) desde el acuífero superior al inferior, en partes donde el acuitardo disminuye su espesor, y se ve debilitada la desconexión hidráulica.
- Adicionalmente, se propone como segunda causa, la terminación de las unidades sedimentarias encargadas de almacenar el acuífero inferior, producto de la falla Oeste. Esta falla actúa como una especie de desconexión hidráulica, ya que yuxtapone unidades volcánicas del complejo Chintoraste de baja conductividad, con rocas sedimentarias de la Formación Calama (*figura 6.13*). Por lo que, el agua ascenderá a través de la falla, ocurriendo la descarga del acuífero inferior en el acuífero superior (Jordan, et al., 2015). Lo antes mencionado, puede ser corroborado a través de un fuerte descenso en los niveles piezométricos del acuífero inferior, al oeste de la falla. Ya que los niveles piezométricos al oeste de la falla se encuentran netamente sustentados por la transferencia de unidades con baja conductividad hidráulica y del flujo regional que provienen desde el noreste (*figura 6.14*).

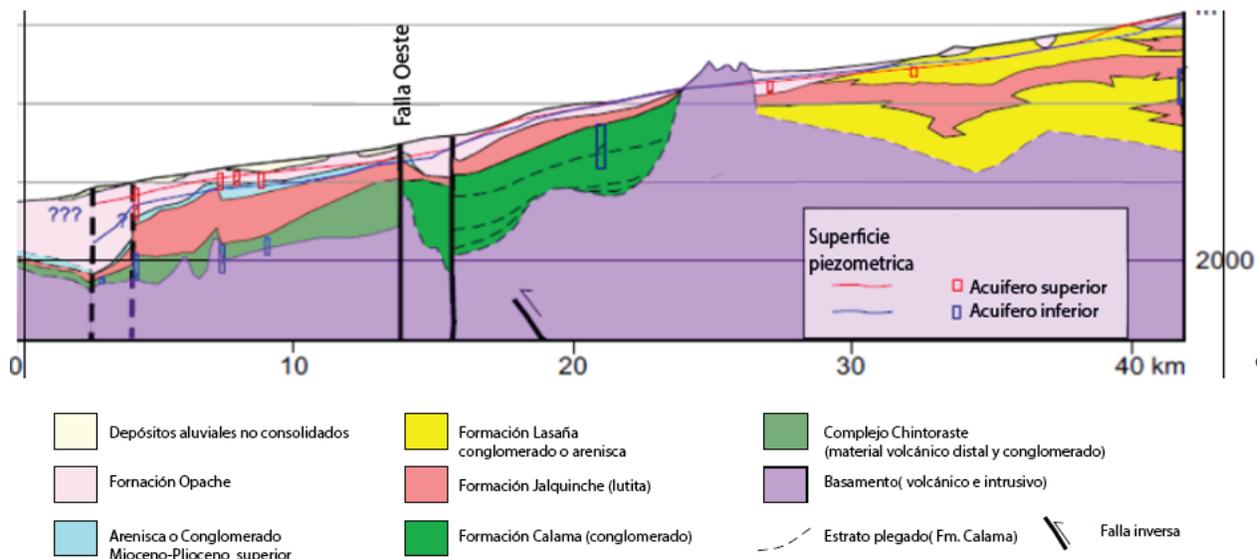


Figura 6.13: Perfil dirección aproximada Este-Oeste sector Calama, modificado de Jordan, 2015

Como resultado de la segunda causa el flujo del acuífero inferior se verá interrumpido, situación que puede ser corroborada a través del descenso abrupto de los niveles piezométricos en dirección Oeste después de pasar por sobre la Falla Oeste. Por lo que el acuífero inferior en la zona de MC estará netamente sustentado por el flujo 1, asociado a razones isotópicas más empobrecidas que se enriquecen progresivamente medida que el flujo 1 avanza en dirección NE-SW como se observa en la figura 6.14.

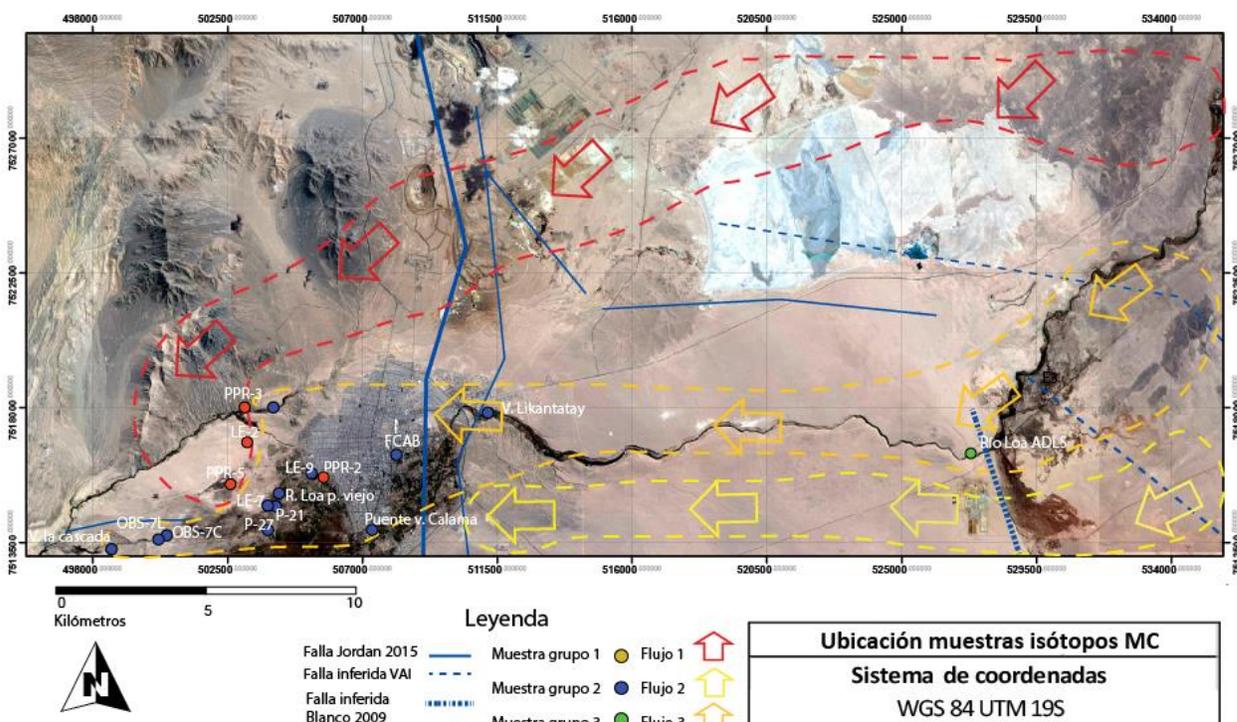


Figura 6.14: Caracterización isotópica de los flujos encargados de la recarga del sistema de acuíferos cuenca del Loa medio.

### 6.4.3 Red de monitoreo DMH

La red de pozos de DMH se ubica principalmente al norte de la cuenca del río Loa, abarcando un área bastante extensa en relación con los pozos de MC y ADLS.

Como se puede apreciar en el gráfico *figura 6.15*, las distintas muestras correspondientes a la red de pozos DMH se pueden clasificar en 5 distintos grupos según su composición. Los grupos 1 y 2 poseen razones isotópicas que se relacionan a la influencia de los flujos 1 y 2. A diferencia de los grupos 2, 2A, 4 y 5 que presentan razones mucho más enriquecidas, anómalas en relación con su ubicación geográfica.

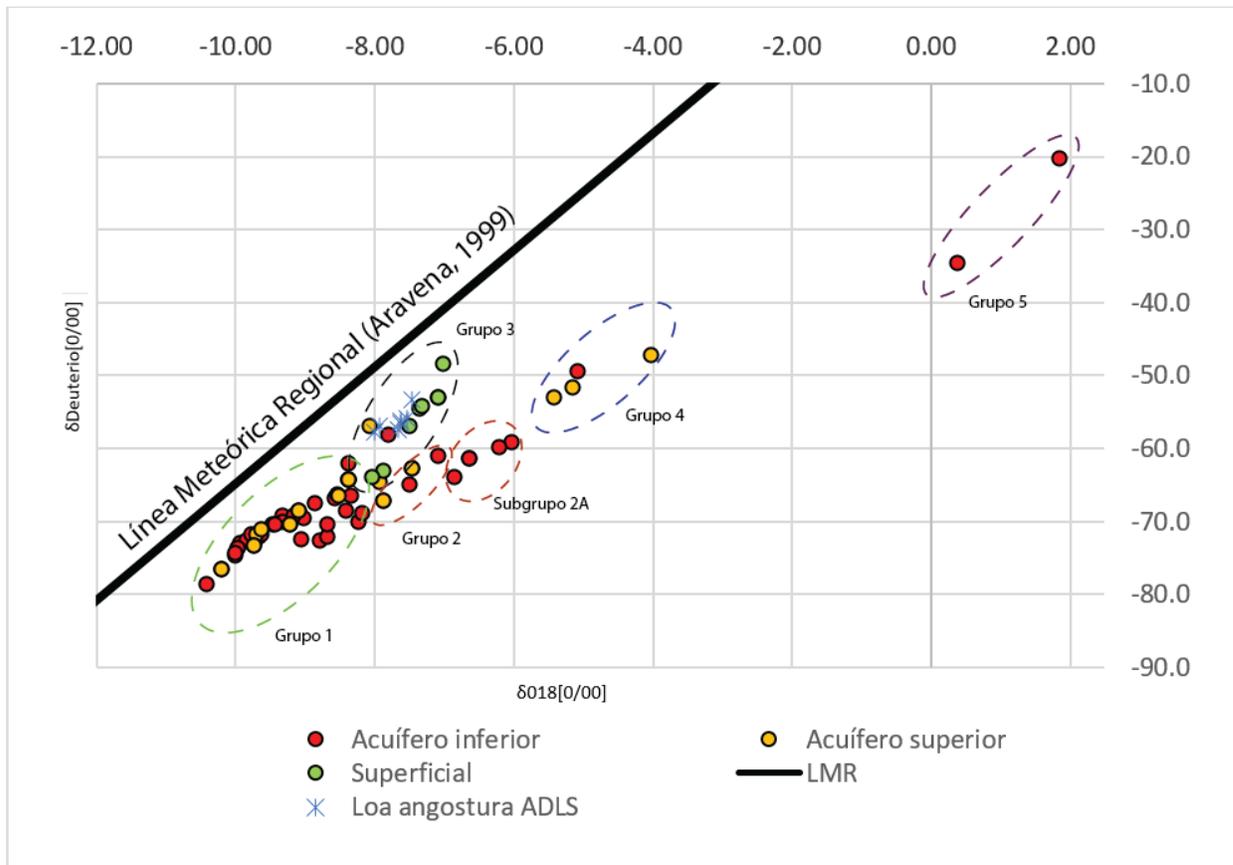


Figura 6.15: Gráfico  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$  de razón isotópica muestras red de pozos DMH.

Con respecto al **grupo 1**, se encuentra compuesto por muestras del acuífero inferior y superior, estas muestras poseen una composición empobrecida en relación a los demás pozos, en rangos de -10.42 a -8.34 para  $\delta^{18}O$ , y -78.5 a -64.3 para  $\delta^2H$ . Por la ubicación geográfica de los pozos se asume una influencia mayor por parte del flujo 1, ya que la distribución de los pozos comienza en la parte noreste de la cuenca, desde donde se asume que provendría este flujo. A medida que se avanza en dirección suroeste las muestras comienzan a volverse progresivamente más pesadas hasta la altura del río Loa, donde en teoría el flujo 1 y 3 comenzarían a mezclarse por lo que su composición se volvería aún más pesada.

La composición de las muestras del acuífero superior e inferior es bastante similar, debido a que estudios recientes (Jordan et al, 2015) demuestran que la presencia del material fino que actúa como acuitado en esta zona no es homogéneo, por lo que variaciones laterales de facie y cambios en espesor podrían resultar en una conexión hidráulica entre el acuífero superior e inferior.

El **grupo 2**, compuesto por muestras del acuífero superior e inferior, estas muestras presentan razones intermedias con respecto a los demás pozos, en rangos de -7.86 a -7.10 para  $\delta^{18}\text{O}$ , y -67.2 a -61.0 para  $\delta^2\text{H}$ , por lo que su razón isotópica está determinada por la influencia de los flujos 1 y 3 con una mayor influencia de este último.

Por su parte, el **grupo 3** está compuesto por muestras de aguas superficiales y del acuífero inferior como superior, siendo las aguas superficiales exclusivas de este grupo. Estas últimas corresponden a muestras del río Loa (como se observa en *la figura 6.16*), cuyos valores se condicionan con los valores de las demás redes de pozos, para aguas superficiales del río Loa. Los valores obtenidos para las aguas superficiales van de -7.01 a -8.13 para  $\delta^{18}\text{O}$  y -48.3 a -57 para el  $\delta^2\text{H}$ , similares a los registrados en los pozos de minera Centinela y ADLS.

Para las muestras pertenecientes al acuífero superior en el grupo 3, se observan razones similares a las aguas superficiales, algo más negativas al tener una mayor influencia del flujo 1, que se mezcla a su vez, con los provenientes del flujo 3. Al igual que en grupo 1 se asume conexión hidráulica en esta zona entre ambos acuíferos para algunos pozos, por lo que también existirán razones isotópicas similares entre el acuífero superior e inferior.

A continuación, se observa que la razón isotópica de los siguientes grupos es anómala, ya que las muestras son considerablemente más pesadas que los flujos encargados de caracterizarlas. Por lo que se propone que la composición original de las muestras es modificada producto de contaminación proveniente desde el Tranque Talabre. Con el fin de caracterizar las razones isotópicas de la contaminación se graficaron los puntos ZAC y DTT en *la figura 6.14*, dichos puntos corresponden a muestras de agua superficial pertenecientes al Tranque Talabre (*ver figura 6.15*).

Junto al grupo 2 existe un subgrupo de pozos, el cual corresponde al **grupo 2A**, dicho subgrupo se ubica entre el Tranque Talabre y el Salar del Indio (*ver figura 6.16*), dicha zona se caracteriza por ser una zona de mezcla entre aguas industriales y subterráneas (DGA,2012), donde las razones isotópicas se ven alteradas por contaminación de flujos subterráneos provenientes desde el tranque. Debido a lo anterior, su razón isotópica no será determinada solo por la influencia de los flujos 1, 2 o 3 y además esta será incongruente en relación con su ubicación geográfica. Las razones isotópicas varían entre -6.84 y -6.03 para  $\delta^{18}\text{O}$  y -63.8 a -59.1 para el  $\delta^2\text{H}$ .

Asimismo, el **grupo 4** al igual que el grupo 2A presenta signos de contaminación, los indicios de contaminación son más claros, debido a que las muestras utilizadas para caracterizar isotópicamente la contaminación pertenecen al grupo. Al igual que en grupo anterior las 3 muestras se encuentran ubicada en la zona próxima al Tranque Talabre. El grupo presenta razones isotópicas que varían entre -5.42 y -3.68 para  $\delta^{18}\text{O}$  y -52.8 a -46 para el  $\delta^2\text{H}$ .

Finalmente, el grupo 5 presenta razones isotópicas mayores que el resto de los grupos, con valores que varían entre 0.38 y 1.85 para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $-34.4$  a  $-20.4$  para el  $\delta^2\text{H}$ . Dichos valores son considerablemente altos en relación con el resto de las muestras y su razón isotópica no se relaciona a ningún flujo subterráneo identificados previamente. Los valores anómalos se podrían relacionar con errores de medición, también se deben considerar errores posteriores asociados al rotulado y clasificación de los datos.

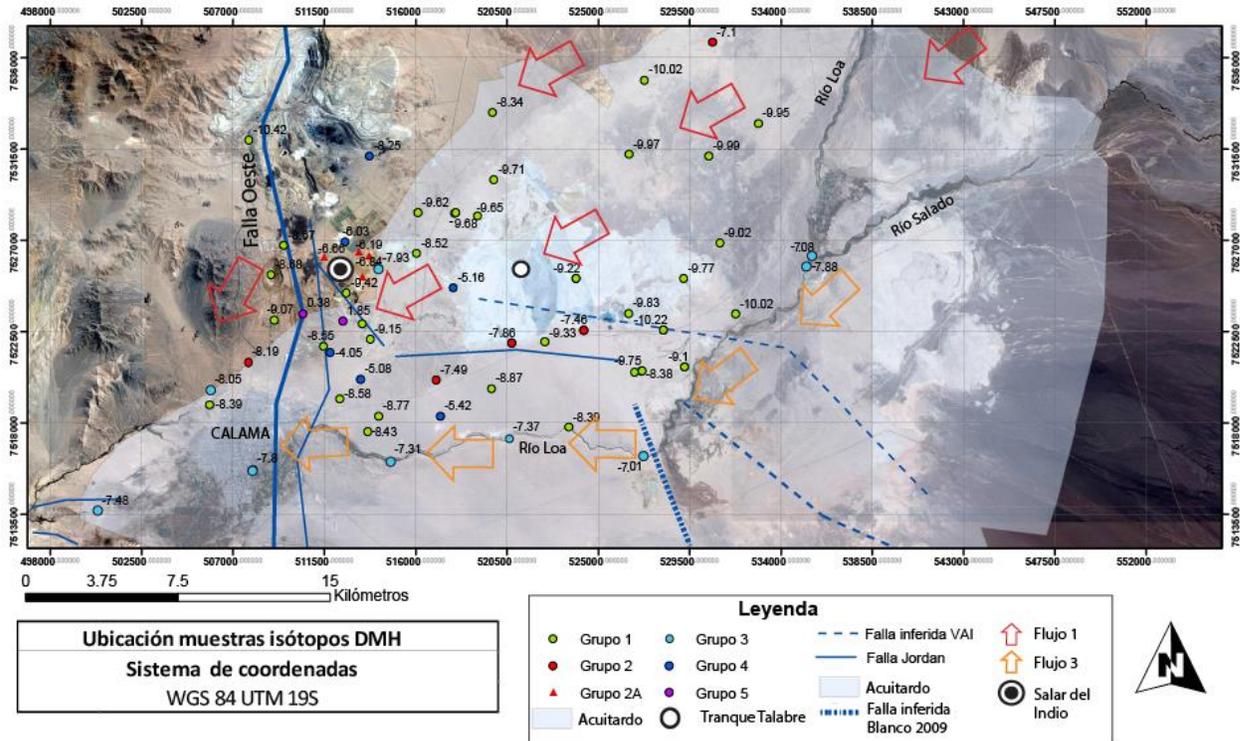


Figura 6.16: Caracterización isotópica de los flujos encargados de la recarga del Sistema de cuenca del Loa medio.

#### 6.4.4 Muestras acuífero Superior e Inferior

Se grafican los resultados obtenidos del análisis isotópico según tipo de acuífero, donde también se establecerán grupos según razones isotópicas, para así identificar la influencia de los distintos flujos descritos anteriormente en el punto 6.3.

Para evitar la saturación de puntos en el gráfico, se graficaron las muestras pertenecientes al acuífero superior e inferior en gráficos independientes con el fin de diferenciar distintos grupos. Ya que, según las caracterizaciones y análisis previos, existen diferencias claras entre la química e isotopía de las aguas pertenecientes a distintos acuíferos en el sector de ADLS, MC y DMH, Por lo anterior, se buscarán similitudes o diferencias en cuanto a las razones isotópicas, entre las aguas pertenecientes al mismo acuífero, pero situados en lugares geográficos distintos.

Finalmente, con las diferencias isotópicas claras entre acuíferos y grupos definidos se graficaron los puntos de las redes ADLS, MC y DMH en un solo gráfico, junto a estos también se graficaron las muestras representativas usadas para definir los distintos flujos en el punto 6.3.

##### 6.4.4.1 Acuífero Inferior

A continuación, se analizan las muestras pertenecientes al acuífero inferior, clasificándolas en distintos campos según rangos isotópicos como se observa en el gráfico de la *figura 6.17*. Además, las muestras se ubican geográficamente (ver *figura 6.18*) para establecer relaciones entre la ubicación y participación de los distintos flujos a la hora de determinar la composición isotópica final de las distintas muestras.

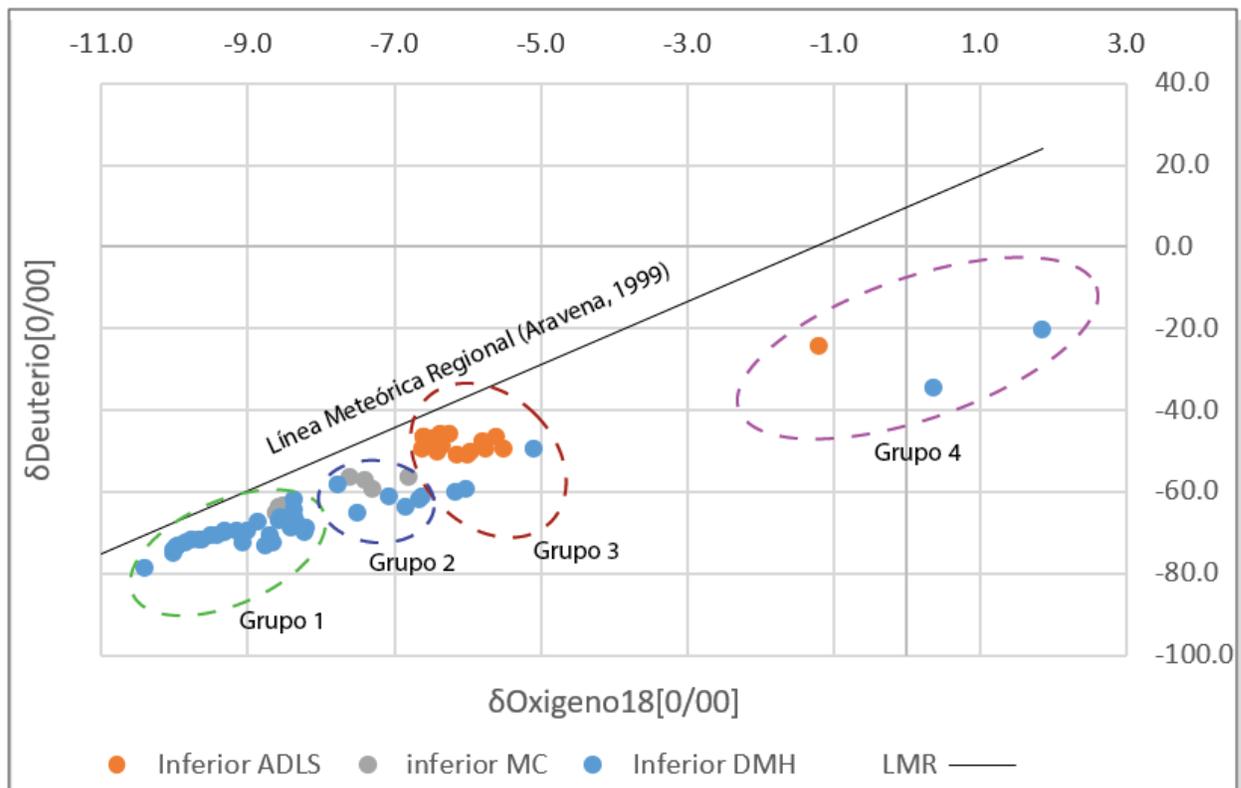


Figura 6.17: Gráfico de  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$  de razón isotópica de muestras pertenecientes al acuífero inferior, para las distintas redes de pozos.

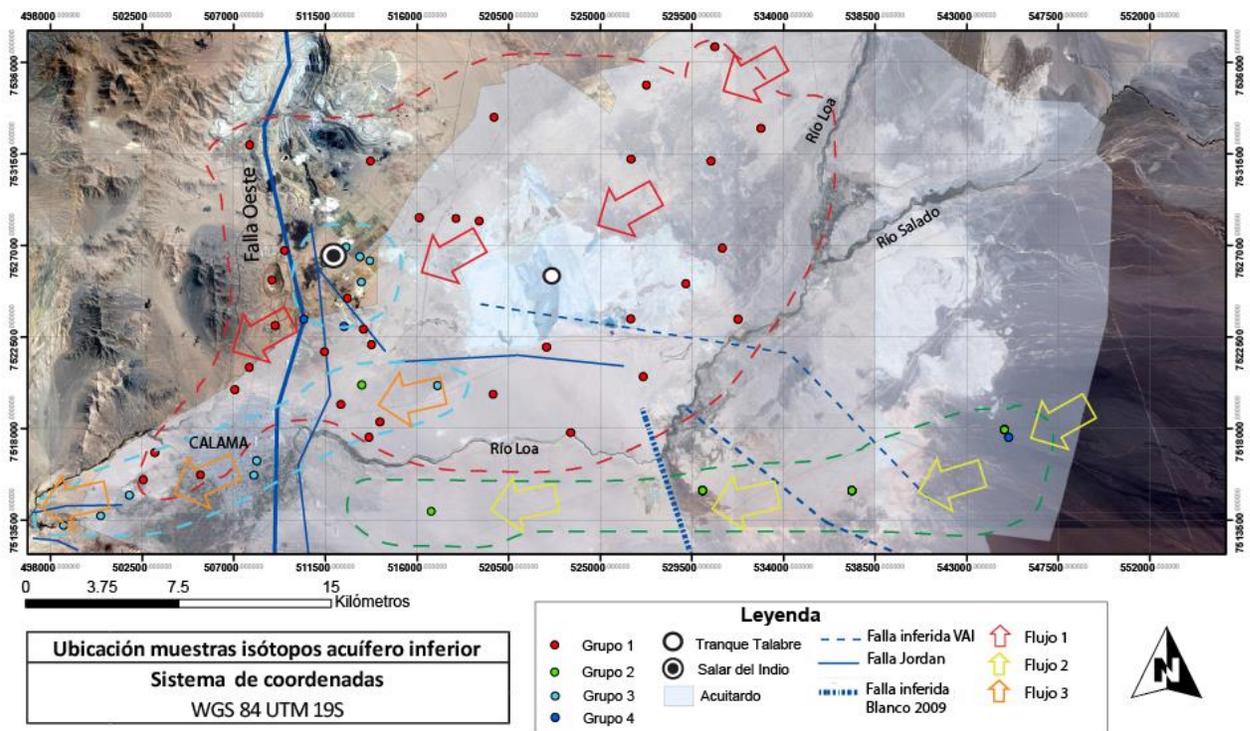


Figura 6.18: Caracterización isotópica de los flujos encargados de la recarga del Sistema de acuíferos inferior en la cuenca de Calama.

El **grupo 1** corresponde a muestras de la red de pozos de DMH y MC, dichas muestras presentan influencia tanto del flujo 1 como del 3, los cuales caracterizan su razón isotópica en diferentes medidas. Dentro del campo verde las muestras presentan variaciones a lo largo de una recta, probablemente producto de que la red de pozos de DMH abarca una mayor área en la cuenca, por lo que el flujo 1 se hace progresivamente más pesado a medida que avanza en dirección SO, ya que recibe una mayor influencia por parte del flujo 3. Una situación análoga ocurre en los pozos MC, que presenta una composición isotópica también asociada al flujo 1, pero con una mucho menor influencia por parte del flujo 3.

En segundo lugar, se observa el **grupo 2**, compuesto también por muestras pertenecientes a la red de pozos DMH y MC, las cuales se caracterizan por tener una composición intermedia en relación al flujo 1 y 3. Debido a que su composición isotópica se asocia a una mezcla entre ambos flujos en distintas razones, por esta razón los valores más negativos se asociarán a una mayor influencia por parte del flujo 1, que es lo que ocurre con los pozos de DMH. Se observa la misma anomalía isotópica que ocurre en el subgrupo 2A en el tema 6.4.3 para los pozos ubicados entre el Tranque Talabre y el Salar del Indio.

Para el **grupo 3**, es posible observar que casi la totalidad de puntos corresponde a muestras de la red de pozos ADLS. Por su parte, las muestras del grupo que pertenecen a la red de monitoreo DMH corresponden a pozos que se ubican en la zona de mezcla entre el Tranque Talabre y el salar del Indio. Esta zona, se ha caracterizado por sufrir infiltraciones de aguas industriales, lo que alterará las razones originales de las muestras de agua, reflejándose esto en razones más pesadas. En cuanto a la muestra OBS-11C, esta presenta una composición anómala en relación a las demás muestras de la red de pozos MC

Finalmente, en el **grupo 4** se observan muestras de razón isotópica pesada en relación a los demás pozos, la cual no es representativa a la hora de caracterizar ninguno de los flujos presentados previamente, por lo que su caracterización no será tomada en cuenta en el presente estudio.

En síntesis, para el acuífero inferior de Pampa Llalqui su composición se caracteriza por ser más pesada, asociada principalmente al flujo 2, con rangos en sus razones isotópicas de -5.5 a -6.6 y -46.6 a 50.9 para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  respectivamente.

Por su parte el acuífero inferior en la zona de MC posee una composición determinada por el flujo 1 con una componente menor del flujo 3, producto de esto, su composición varía en rangos de -8.62 a -6.8 para el de  $\delta^{18}\text{O}$  y entre -55.97 a -56.4 para el  $\delta^2\text{H}$ .

El acuífero inferior de la zona de estudio de DMH, deja en evidencia la fuerte influencia por parte de las aguas asociada al flujo 1, ya que se puede observar como la composición isotópica se enriquece a medida que se avanza en dirección SO y a medida que se acerca más al flujo 3. DMH presenta razones isotópicas que varían entre -7.10 y -10.42 para  $\delta^{18}\text{O}$  y entre -78.5 y -61 para  $\delta^2\text{H}$ . Existen un par de casos para los cuales la composición isotópica de las muestras es similar a las del acuífero superior, esto se explica por la conexión hidráulica que existe entre estos, producto de variaciones en el espesor, como también de cambios laterales de facies que pueda experimentar el acuitardo.

### 6.4.4.2 Acuífero superior

Al igual que para el acuífero inferior, las muestras fueron divididas según los valores de las razones isotópicas, determinadas por la influencia de los distintos flujos. En el gráfico de la *figura 6.19*, al dividir las muestras según estos rangos, resultaron 3 grupos, los cuales son nombrados y diferenciados a través de distintos colores.

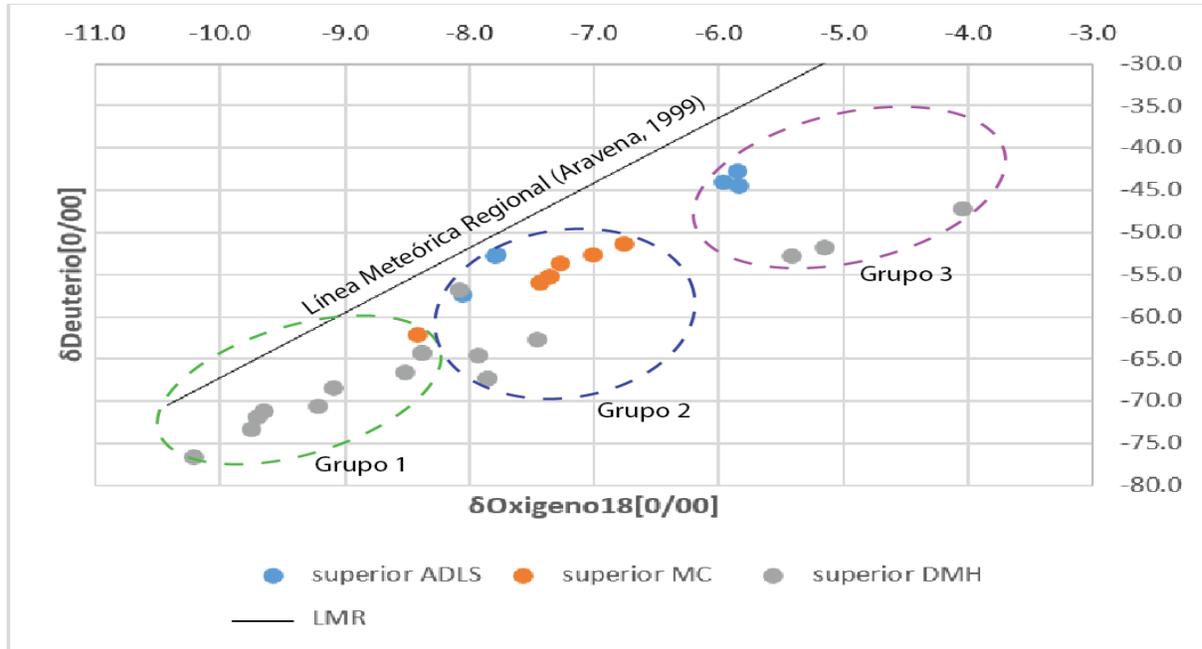


Figura 6.19: Gráfico de  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$  de razón isotópica de muestras pertenecientes al acuífero superior, para las distintas redes de pozos.

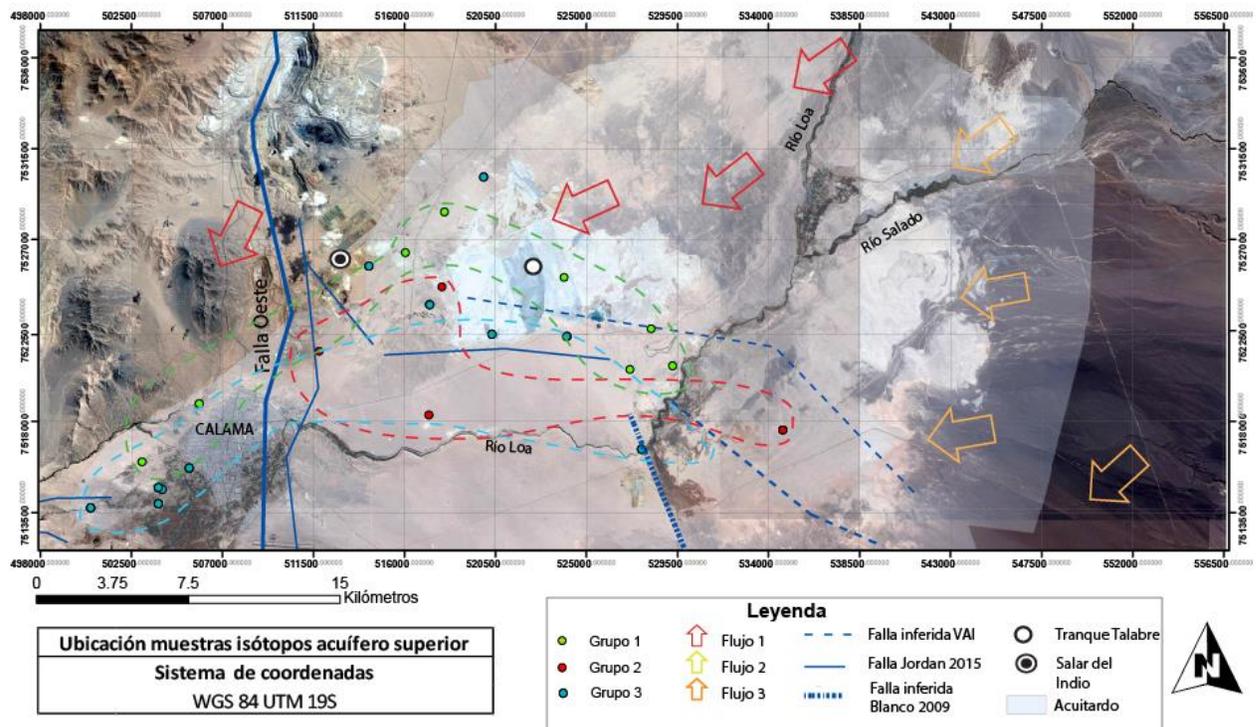


Figura 6.20: Caracterización isotópica de los flujos encargados de la recarga del Sistema de acuíferos superior en la cuenca de Calama.

El campo verde corresponde al grupo 1, el cual se encuentra conformado casi en su totalidad por muestras del campo DMH, a excepción de una muestra, perteneciente a MC. El grupo se caracteriza por tener una composición isotópica sustentada principalmente por el flujo 1 que proviene desde el noreste, de una composición isotópica mucho más empobrecida en relación a las aguas subterráneas de Pampa Llalqui.

El grupo 2 se encuentra conformado por agua de las tres redes de pozos, lo cual deja en evidencia nuevamente que en las 3 localidades la conexión hidráulica que existe entre las aguas superficiales y el acuífero superior. Este grupo se caracteriza por presentar una composición isotópica asociada a la participación del flujo 3 y 1.

Finalmente, el grupo 3 corresponde a muestras de la red de pozos ADLS y DMH. Las muestras pertenecientes a DMH se encuentran ubicadas al norte del río Loa, cercanas a la zona de mezcla entre el Tranque Talabre y el Salar del Indio, por lo que su composición será producto de influencia de aguas de actividades mineras, la contaminación es respaldada a través de análisis químicos donde se observan elevados valores de molibdeno (es importante destacar que previamente en el punto 6.4.3 se caracterizó isotópicamente a las muestras contaminadas y estas fueron identificadas.).

Las muestras pertenecientes a ADLS poseen una composición isotópica determinada principalmente por el flujo 2

Recapitulando la información, es posible establecer diferencias isotópicas entre el acuífero superior de Pampa Llalqui y la cuenca del Loa medio, donde en la mayoría de los casos estos siguen determinadas tendencias. Para el caso de Pampa Llalqui, la única muestra que representa la composición isotópica del acuífero superior es PL-S6, la cual es sustentada por el flujo 3, con una componente mayor proveniente desde el flujo 1, por lo que sus razones isotópicas exhibirán valores de -8.1 y -57.3 para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ . respectivamente. Por su parte, los acuíferos DMH y MC muestran una notable influencia por parte de las aguas superficiales y el flujo regional noreste, por lo que sus valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  llegarán hasta -10.22 y -76.6 respectivamente.

Los puntos que presentan razones isotópicas anómalas en relación a los demás, es atribuible a la contaminación, provenientes desde aguas desde el acuífero inferior al superior o viceversa producto de las fallas presentes en el sector de MC como también a la conexión hidráulica que existe en la zona de DMH. Al igual que en el acuífero inferior también puede existir contaminación por parte de aguas de procesos mineros, situación que puede ser corroborada a través de los elevados contenidos de Cu y Mb y los altos valores obtenidos en las razones isotópicas.

### 6.4.4.3 Acuífero superior e inferior

Finalmente, en la figura 6.21 se grafican los puntos de las redes ADLS, MC y DMH en un solo gráfico, junto a estos también se graficaron las muestras representativas usadas para caracterizar los distintos flujos en el punto 6.3. No se consideran las muestras de agua superficiales que no correspondan a ríos (lagos pequeños, vertientes, etc) además se realiza un promedio para algunas muestras con el fin de evitar la acumulación de puntos y así facilitar la interpretación y análisis de datos en el gráfico (las muestras que corresponden a promedios llevan un asterisco junto su nombre).

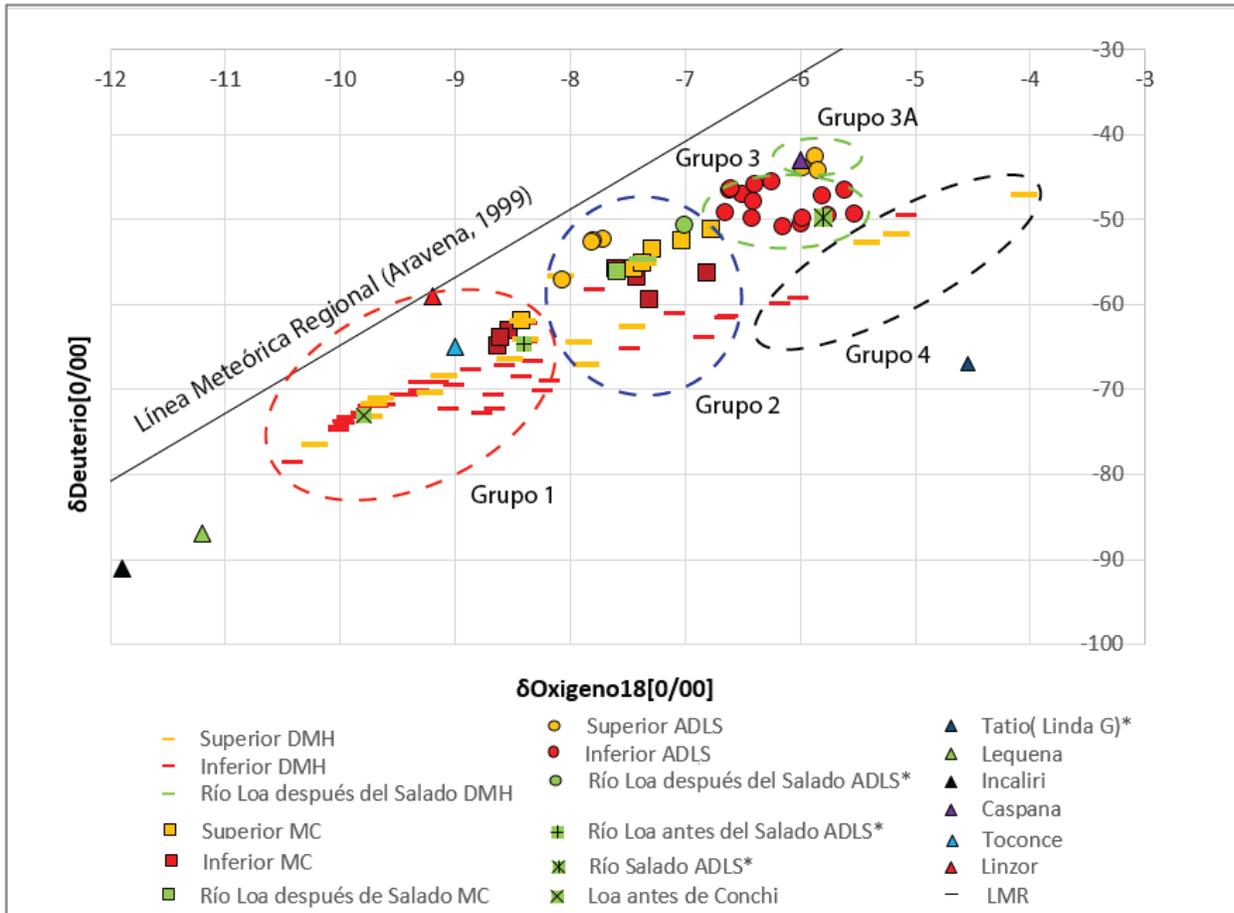


Figura 6.21: Gráfico de  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$  de razón isotópica de muestras pertenecientes al acuífero superior, para las distintas redes de pozos.

Cómo se pudo observar en las secciones anteriores para el acuífero superior e inferior, existen diferencias en cuanto a la razón isotópica de los distintos pozos según su ubicación geográfica, ya que su razón está determinada por la mezcla en distintas proporciones de los flujos 1,2 y 3. La importancia en esta sección radica en destacar las diferencias y semejanzas para las razones isotópicas de los acuíferos superior e inferior en las distintas redes de pozos. Se observa que las muestras se agrupan principalmente en 5 grupos los cuales son descritos a continuación, también se observan muestras que quedan fuera de estos grupos debido a que son considerablemente livianas o pesadas y corresponden a los valores extremos usados para definir la razón isotópica predominante de los distintos flujos en el punto 6.3.

El **grupo 1**, se encuentra conformado por muestras del acuífero superior e inferior de la red de monitoreo DMH y MC además de muestras utilizadas para caracterizar el flujo 1. Sus razones isotópicas se encuentran empobrecidas en relación a los demás grupos presentando razones de  $\delta^{18}\text{O}$  en un rango de -10.42 a -8.19 y razones de  $\delta^2\text{H}$  que varían entre -78.5 y -59 las cuales se condicen con una mayor influencia del flujo 1.

En segundo lugar, el **grupo 2** se encuentra conformado por muestras del acuífero superior e inferior de casi todas las redes de pozos a excepción de muestras del acuífero inferior de la red ADLS. También existen de muestras de agua superficial utilizadas para caracterizar el flujo 3. Las muestras presentan razones isotópicas de valores intermedios en relación con los demás grupos, en rangos de -8.1 a -6.7 para  $\delta^{18}\text{O}$  y de -67.2 a -50.8 para  $\delta^2\text{H}$ , estos valores se asocian a una mayor influencia del flujo 3.

El **grupo 3**, conformado principalmente por muestras del acuífero inferior de la red de pozos ADLS, también presenta muestras del río Salado utilizadas para caracterizar el flujo 2. La composición isotópica del grupo varía en rangos de -6.6 a -5.5 para  $\delta^{18}\text{O}$  y de -50.7 a -45.6 para  $\delta^2\text{H}$ , donde es evidente la casi total influencia por parte del flujo 2.

Por su parte el **grupo 3A**, a pesar de presentar razones en rangos similares al grupo 3 es importante diferenciarlo. Las muestras del grupo 3A corresponden a muestras del acuífero superior que presentan razones isotópicas anómalas, esto ocurre debido a un control estructural presente en esa zona, el cual produce la descarga del acuífero inferior en el superior y su posterior mezcla. En el grupo también se observa una muestra de agua superficial que corresponde a Caspana la cual fue utilizada para caracterizar el flujo 2. La composición isotópica del grupo varía en rangos de -6.0 a -5.8 para  $\delta^{18}\text{O}$  y de -50.7 a -45.6 para  $\delta^2\text{H}$ ,rangos similares a los que se observa en las muestras del acuífero inferior.

Finalmente, el **grupo 4** se encuentra conformado por muestras del acuífero superior e inferior de la red de monitoreo DMH, las cuales presentan razones isotópicas anómalas en relación a su ubicación, producto de la mezcla de aguas, estas muestras contaminadas fueron identificadas y caracterizadas previamente en el punto 6.4.4.

En resumen, se observa lo descrito previamente en cuanto a las distintas influencias de los flujos 1, 2 y 3 a la hora de caracterizar las muestras del acuífero superior e inferior en las distintas zonas. Ya que la diferencias que puedan existir estarán determinadas por la ubicación geográfica de las muestras, las cuales a vez presentarán razones isotópicas distintas si pertenecen al acuífero superior o inferior respectivamente.

Es preciso señalar que las razones isotópicas que presenta el acuífero inferior en el sector de Pampa Llalqui son considerablemente más pesadas en comparación al resto, considerando inclusive, a las muestras acuífero superior y aguas del río Loa. Esto se explica por una influencia total del flujo 2 sobre las muestras del acuífero inferior como también sobre las muestras del río Salado.

## **6.5 Sólidos totales disueltos (STD)**

El análisis químico tanto como el isotópico fue realizado en los mismos pozos, por lo que la ubicación espacial de las muestras corresponderá a la misma. El análisis químico realizado por los distintos laboratorios, entrega información sobre concentración de los elementos mayores y menores, como también fueron medidos en terreno distintos parámetros fisicoquímicos. Dependiendo del laboratorio que realiza los análisis se registra la concentración de metales disueltos.

Debido a que en estudios previos se ha relacionado la concentración de STD con los análisis isotópicos, en el presente estudio no se realiza un análisis hidroquímico completo, sino que una revisión y caracterización de los STD.

Con respecto a los Sólidos totales disueltos se obtuvieron distintos valores, los cuales fueron agrupados según red de pozos y acuífero, para así observar similitudes entre muestras del mismo tipo de aguas e identificar valores anómalos.

### **6.5.1 Sólidos totales red de pozos ADLS**

Los análisis realizados por ADLS presentaron composiciones variables, debido a esto, se realizó un estudio detallado para cada tipo de agua, donde se formaron subgrupos con el fin de definir rangos composicionales, es importante destacar que la mayoría de los laboratorios realizaron análisis de los mismos elementos y parámetros fisicoquímicos a excepción de ADLS que realizó un análisis químico más completo registrando gran cantidad de elementos, entre estos se destaca el As y Sr.

#### **6.5.1.1 Aguas Superficiales**

En lo que respecta a las muestras de **agua superficial**, estas presentan valores relativamente constantes, siendo posible observar concentraciones que varían de 2135 a 4560 ppm, y cuya concentración mínima de STD corresponde a aguas del río Loa. Mientras que, el valor más elevado corresponde a aguas del río Salado.

Dentro del grupo de las aguas superficiales, destaca la alta concentración de arsénico, la cual se manifiesta producto de la disolución de tobas soldadas e ignimbritas riolíticas, litologías por las cuales escurre el río Salado y posteriormente desemboca en el río Loa. Las concentraciones más elevadas de As las presenta el río Salado con un contenido de As de 1.42 ppm, valores elevados en comparación a las muestras del río Loa antes de confluir con el río Salado, cuyo valor es de 0.29 ppm. Luego de la confluencia, el río Loa aumenta su concentración de As hasta 1.1 ppm reflejando la evidente mezcla entre estos tipos de agua

#### **6.5.1.2 Acuífero Superior**

Referente a las muestras pertenecientes al **acuífero superior**, estas se caracterizan por diferencias composicionales entre los pozos instalados en el sector central norte (*PL-S3*, *PL-S4* y *PL-S6*), los instalados en el límite oeste (*PL-S1A*, *PL-S1B*, *PL-S2* y *PL-D2*), y los que pertenecen al sector central-este de Pampa Llallqui (*P2* y *W2*). Particularmente, tales diferencias composicionales se manifiestan en las elevadas concentraciones de STD de estos 2 últimos grupos.

A continuación, se representarán geográficamente las muestras, y estas son divididas en subgrupos de STD bajo y STD alto según corresponda.

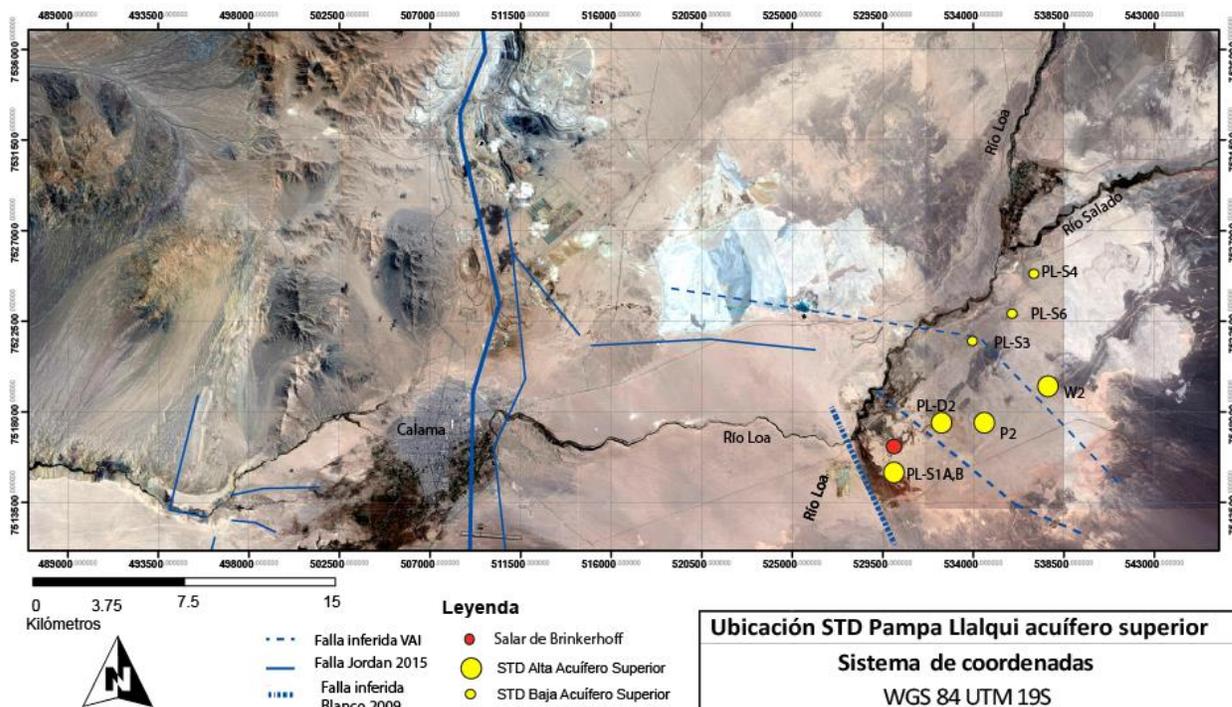


Figura 6.22: Ubicación muestras acuífero superior Pampa Llalqui con registro STD.

Grupo STD Baja: Referente al subgrupo de STD bajos, las muestras en la mayoría de los pozos presentan composiciones similares a la mezcla de las aguas superficiales del río Loa y Salado. Los valores observados de STD varían entre 1970 (*PL-S4*) y 3670 ppm (*PL-S6*), por su parte, tanto elementos mayores como menores se encuentran en bajas concentraciones. Una excepción es el arsénico, cuyas concentraciones en los pozos *PL-S3* Y *PL-S6* alcanzan valores de hasta 2.02 y 2.52 ppm respectivamente, estos valores hacen referencia a una mayor influencia por parte de las aguas provenientes del río Salado sobre dichos pozos.

La similitud composicional antes expuesta, puede ser explicada a través de la interconexión hidráulica que existe entre el acuífero superior y el río Loa. Por lo que se propone una mayor influencia por parte de las aguas asociadas al flujo 1 y 3.

Grupo STD alta: Por su parte, este grupo destaca por el contenido alto de STD, con valores que fluctúan entre 6410 y 12200 ppm, correspondientes principalmente a pozos ubicados en el sector central y sur oeste de la subcuenca. Los análisis químicos indican altas concentraciones tanto de los elementos mayores como menores. Sin embargo, las muestras presentan bajas concentraciones de arsénico al igual que Sr.

En síntesis, las concentraciones químicas elevadas de los distintos elementos y las bajas concentraciones de arsénico dejan en evidencia una mayor influencia por parte de aguas pertenecientes al acuífero inferior. Por lo que se propone, como posible explicación a esta anomalía, la eventual mezcla de aguas del acuífero inferior con el superior en el límite suroeste de Pampa Llalqui, respaldado por la surgencia del acuífero inferior en dicha zona (ver *figura 6.11*).

Con respecto a los pozos ubicados en la parte central, es posible asociar su elevado valor de STD a que estos se encuentran habilitados a una mayor profundidad. Vale destacar, que estos pozos, al ser más profundos tendrán una mayor proximidad con el acuífero inferior y sus aguas, serán progresivamente más antiguas al tener que recorrer mayor distancia al infiltrar por lo que al tener un mayor tiempo de permanencia sus concentraciones irán aumentando progresivamente producto de un reequilibrio con las rocas.

### 6.5.1.3 Acuífero inferior

Las aguas pertenecientes al acuífero inferior se caracterizan por poseer un amplio espectro composicional de STD, que varía entre 3165 y 108000 ppm. Además, las muestras fueron sacadas a una mayor profundidad (170 a 500 m) en relación al acuífero superior. En atención a dichos rangos composicionales se realiza la siguiente clasificación, también se ubican geográficamente las muestras para observar variaciones composicionales según ubicación.

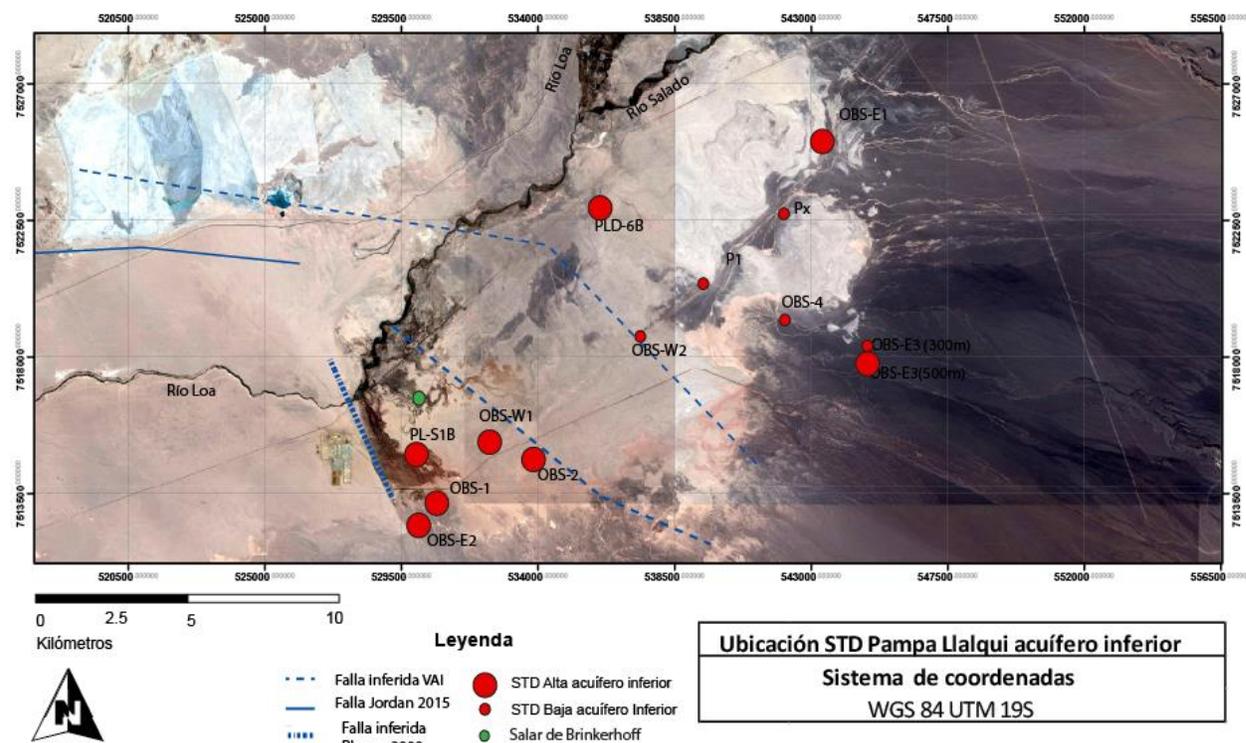


Figura 6.23: Ubicación muestras acuífero inferior Pampa Llalqui con registro STD.

Grupo 1: Este grupo corresponde a muestras con valores moderado de STD, sus concentraciones varían de 3165 a 19000 ppm. En cuanto a las concentraciones de la mayoría de los elementos mayores y menores, estos se encuentran elevados en comparación a los pozos habilitados en el acuífero superior. Lo anterior, denota gran diferencia respecto de las concentraciones de arsénico, las cuales presentan valores bajos, en un rango que va de 0.03 a 0.04 ppm. El bajo contenido de arsénico se asocia a que las aguas del acuífero inferior no se encuentran expuestas de forma directa a las aguas del río Salado.

Con respecto a las concentraciones de estroncio, estas se encuentran alrededor de los 20 ppm, valor relativamente alto en comparación a las muestras del acuífero superior. Esta alta concentración, es resultado de procesos de disolución del aragonito presente en la roca, fenómeno que libera estroncio como resultado de la sustitución iónica del calcio. Es importante destacar que se ha detectado la presencia de aragonito en sondajes pertenecientes a diversas formaciones asociadas al acuífero inferior.

Grupo 2: Este grupo corresponde a muestras con altos valores de STD, que fluctúan entre 19500 y 108000 ppm. Cabe destacar, que para OBS-E2 los STD no se determinaron en el laboratorio, si no que el valor fue obtenido al multiplicar la conductividad eléctrica por 0.66 (Hounslow, 1995).

Las concentraciones de los elementos mayores y menores se encuentran elevados hasta en un orden de magnitud en referencia a las aguas del acuífero superior y superficiales a excepción de As que presenta concentraciones entre 0.03 y 0.017 ppm. Además, se destacan las concentraciones de Sr en el análisis de estas muestras ya que alcanza valores de hasta 328 ppm en el pozo OBS-E2.

Los valores de STD elevados, se deben a un mayor tiempo de permanencia de las aguas en el acuífero inferior sumado a la interacción agua roca, en particular con la Formación Yeso, la cual está constituida por minerales evaporíticos. La disolución y asimilación de los minerales por parte de las aguas es favorecida por la baja permeabilidad del medio poroso, lo que también favorece el proceso de diferenciación en el cual aguas con mayores concentraciones tenderán a encontrarse a mayor profundidad.

En resumen, las aguas del acuífero inferior se caracterizan por presentar concentraciones elevadas para los elementos mayores y menores, como también de STD moderadas a altas. La concentración de Sr denota que las aguas del acuífero inferior serían de un origen distinto a las del superior, otro elemento importante es el arsénico, el cual indica una menor interacción del acuífero inferior con aguas superficiales provenientes desde el río Salado.

## 6.5.2 Sólidos totales disueltos (STD) red de pozos Minera Centinela

Para la red de pozos Minera Centinela las muestras se clasificaron formando 3 grupos: acuífero superior, inferior y aguas superficiales según corresponda.

A continuación, las muestras son ubicadas geográficamente en la *figura 6.24* y caracterizadas según concentración de elementos mayores y menores, STD y también As.

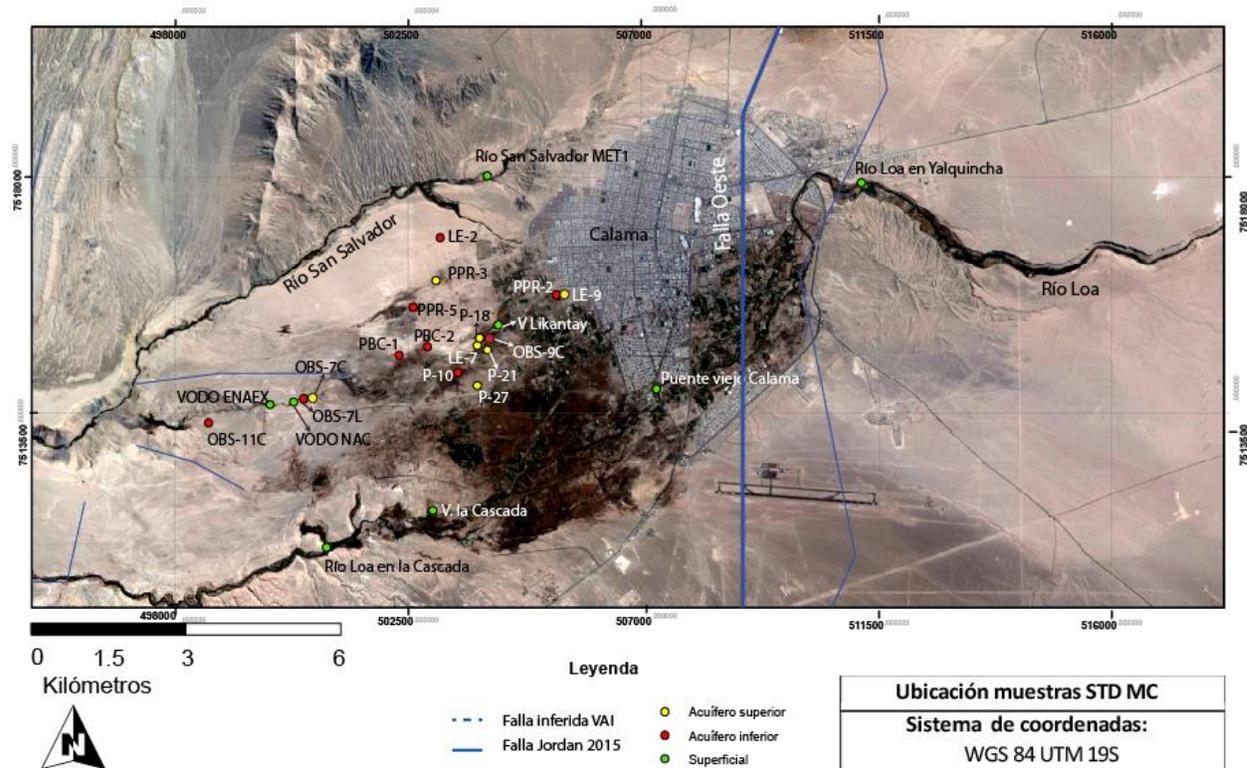


Figura 6.24: Ubicación muestras con registro de STD red de pozos MC.

### 6.5.2.1 Aguas superficiales

El grupo compuesto por **aguas superficiales** presenta concentraciones bajas y relativamente constantes de elementos mayores y menores. La concentración de STD varía entre 3460 y 4980 ppm, valores bajos en comparación del acuífero inferior. El único elemento que se encuentra elevado en relación al acuífero inferior es el As, que alcanza valores de hasta 1.9 ppm en la muestra *Loa la Cascada*.

### 6.5.2.2 Acuífero Superior

De igual forma el grupo compuesto por muestras pertenecientes al **acuífero superior**, ubicadas al oeste de la ciudad de Calama, presenta valores composicionales muy similares a las aguas superficiales. El acuífero superior registra valores elevados de As de hasta 2.07 ppm en la muestra P-21, además de una concentración de STD que varía entre 3490 y 4770 ppm.

### 6.5.2.3 Acuífero Inferior

En contraste a las aguas superficiales y el acuífero superior, el **acuífero inferior** registra valores algo más elevados de elementos mayores y menores, con excepción del arsénico que presenta concentraciones variables de 0.004 hasta 0.4, bajas en relación a las aguas del acuífero superior y aguas superficiales. La concentración de STD varía entre 2340 ppm y 6510 ppm en los pozos *OBS-11C* y *OBS-9C*. El bajo contenido de As deja en evidencia la menor influencia por parte de las aguas superficiales sobre el acuífero inferior.

En resumen, la concentración de elementos mayores y menores entre los el acuífero inferior y superior es bastante similar, solo existen diferencias composicionales importantes en el contenido de As. Esto último deja en evidencia la conexión hidráulica que existe entre el acuífero superior y las muestras de agua superficial, como también de una mayor influencia por parte de las aguas del flujo 3.

Por su parte el acuífero inferior muestra una menor influencia de las aguas del río Loa y las del flujo 3, respaldada por las bajas concentraciones de arsénico.

### 6.5.3 Sólidos totales disueltos red de pozos DMH

La red de pozos de DMH es de mayor envergadura que las demás redes de pozos, la cual se extiende abarcando la parte norte de la cuenca de Calama como se observa en la *figura 6.25*. Los análisis realizados por DMH arrojaron composiciones variables, por lo cual se realiza un estudio detallado por acuífero, definiendo grupos según rangos composicionales de STD, los cuales se presentan a continuación.

En general, en las redes de pozos MC y ADLS existen diferencias composicionales marcadas entre el acuífero superior e inferior. En estos la concentración de elementos mayores, menores y el parámetro STD es elevada principalmente en el acuífero inferior. A diferencia de la red de pozos DMH, debido a la conexión hidráulica que existe entre el acuífero inferior, superior, lo que resulta en muestras pertenecientes al acuífero superior con una concentración de STD elevados. Esta conexión hidráulica será resultado de la ausencia del acuitardo en algunas partes de la cuenca como se observa en la *figura 6.25*.

También se plantea el aumento de elementos y STD producto de contaminación con aguas provenientes desde el tranque de relaves Tranque Talabre, situación que se puede corroborar observando los niveles de SO<sub>4</sub>, Cu y Mo en las distintas muestras. En el presente estudio se acepta el aumento de STD como resultado de estas dos situaciones.

#### 6.5.3.1 Aguas superficiales

Las muestras de agua superficial del río Loa aguas abajo de angostura presentan concentraciones bajas a moderadas de elementos mayores y menores, además sus concentraciones de STD se encuentran entorno a los 3000 ppm. Las muestras exhiben concentraciones de As elevadas en relación al acuífero superior e inferior en la zona de DMH, alcanzando valores de hasta 1.2 ppm.

### 6.5.3.2 Acuífero Superior

Dentro de los pozos habilitados en el acuífero superior encontramos pozos de STD bajos, medios, y pozos de STD altos:

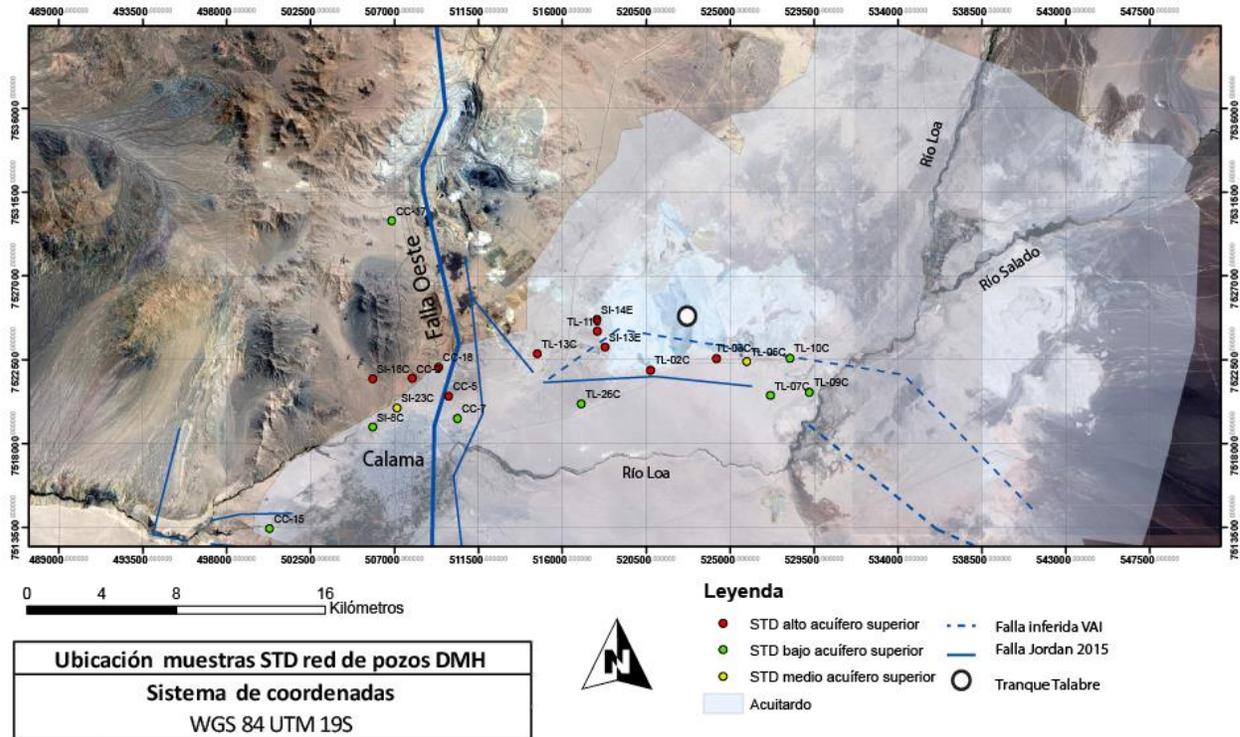


Figura 6.25: Ubicación muestras con registro de STD red de pozos acuífero superior DMH.

El grupo de **STD bajos** presenta valores de STD comprendidos entre 2572 y 4832 ppm. Dichos pozos exhiben concentraciones bajas a moderadas de elementos mayores y menores. Por otra parte, sus concentraciones de molibdeno y Cu se encuentran muy bajas en relación con muestras que han sido influenciadas por aguas de actividades mineras. Es así que, descartando posible contaminación minera, se puede concluir que, las concentraciones de As, que van de 0.420 hasta 1.49, se deberían atribuir netamente a la influencia de la mezcla, del flujo 3 y aguas superficiales del río Salado y Loa. Ya que, presenta valores de STD similares a las muestras de aguas superficiales, con un leve aumento en dicho parámetro, lo que se puede atribuir al reequilibrio con la roca huésped.

El grupo de **STD medios** corresponde a los pozos TL-06C y SI-23, ubicados al sur del Tranque Talabre y norte de la ciudad de Calama, en los cuales se observan concentraciones comprendidas entre 9380 y 10680 ppm. Este grupo presenta concentraciones intermedias tanto de elementos mayores como menores, al igual que de As. Sus bajas concentraciones de Cu y Mo, y su composición intermedia se podrían asociar a aguas que vienen desde el flujo 1 y 3. Su aumento de STD se puede atribuir a zonas de menor permeabilidad y de menor renovación de aguas, en las cuales el reequilibrio con la roca huésped es mayor, aumentando así, la cantidad de sólidos totales disueltos.

El grupo de los **STD altos** ubicados en las cercanías del Tranque Talabre y el norte de Calama, presenta valores que van desde 12536 hasta 56844 ppm para los pozos CC-5 y TL-13C respectivamente. En todos los pozos los elementos mayores y menores se encuentran elevados, así también los valores de arsénico con respecto a los pozos pertenecientes al acuífero inferior, presentando el pozo TL-13C un valor de 3.6 ppm. Los altos valores composicionales y de STD, se explican mediante 2 posibles hipótesis:

La **primera hipótesis** sugiere que los valores elevados de STD se deben a la mezcla de aguas asociada a infiltraciones provenientes desde el Tranque Talabre. Esta situación estaría respaldada por los altos contenidos de molibdeno y cobre registrados en algunos pozos. También es de suma importancia destacar que los flujos que caracterizan al acuífero superior en la zona de DMH no presentan concentraciones de STD tan elevadas, por lo que este aumento drástico se deberá a la contaminación propuesta.

En la *figura 6.26* se observa una propuesta de la zona de contaminación (delimitada en rojo), esta fue inferida al asociar la concentración de STD a diferentes tamaños de circunferencias, por lo que un mayor tamaño se traduce en una mayor concentración. Se observa un claro aumento en los STD al ir desde Pampa Llalqui hasta el norte de Calama en dirección Oeste, un aumento significativo que ocurre al aproximarse a la zona oeste del Tranque Talabre, dicho aumento se mantiene hasta el norte de Calama para luego disminuir paulatinamente en dirección Suroeste.

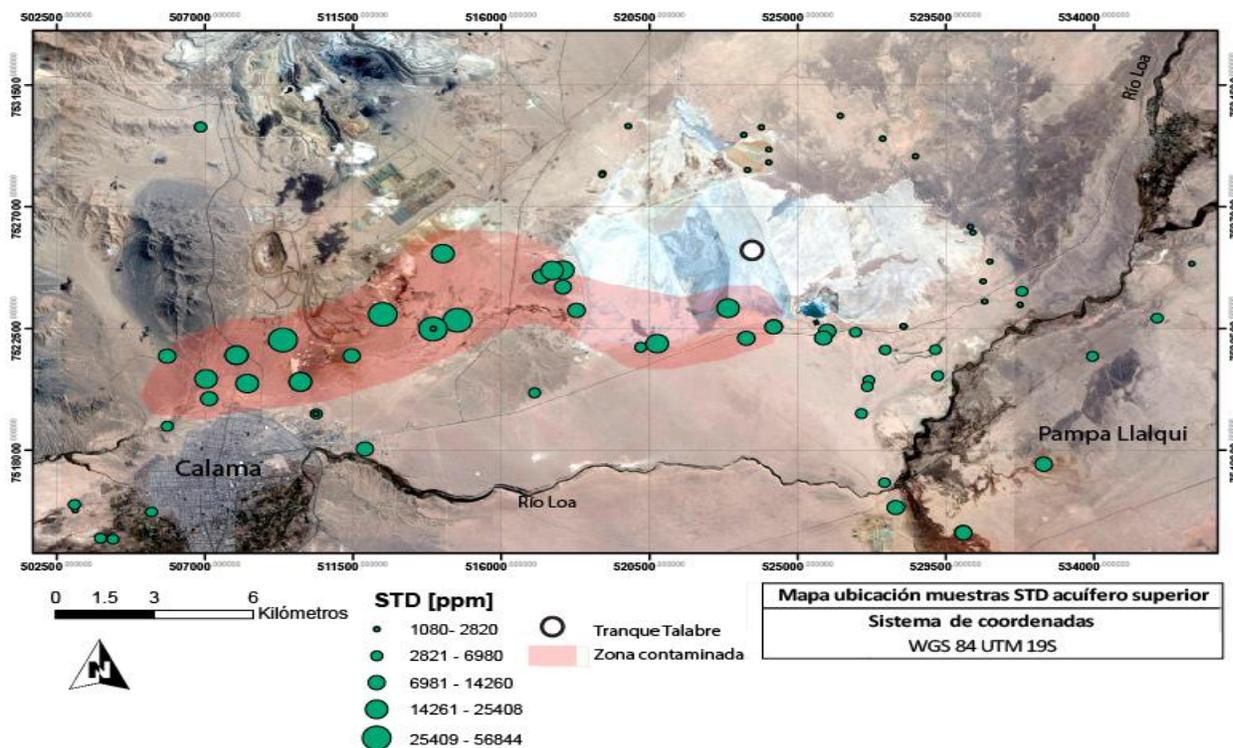


Figura 6.26: Mapa de zona contaminada inferida a través de la concentración STD en el acuífero superior en las redes de pozos MC, DMH y ADLS.



STD altos: El tercer grupo corresponde a muestras con concentraciones que van de 18256 ppm en el pozo PBMM-1, hasta 46108 ppm registrados en el pozo PBMM-3. Este grupo presenta concentraciones altas a muy elevadas tanto en elementos mayores como menores, a diferencia del As que presenta valores entre 0.03 y 0.8 ppm.

La mayoría de los pozos en este grupo se encuentran ubicados al norte de la ciudad de Calama cercanos al muro oeste del Tranque Talabre, por lo que su aumento en las concentraciones de los elementos y STD se podría atribuir a la contaminación por parte de aguas industriales.

El aumento de las concentraciones por contaminación solo tiene sentido si se respalda con concentraciones de SO<sub>4</sub>, Cu o Mo, pero en este grupo solo la muestra CC-1 presenta contenidos elevados de Cobre y Molibdeno por lo que se propone una segunda hipótesis:

La Falla Oeste replica el mismo escenario estructural que ocurre en la zona de MC. Donde la falla pone fin a la unidad que transporta al acuífero inferior, superponiendo unidades con permeabilidades muy distintas, lo que provoca la descarga del acuífero inferior en el superior a través de la falla. Esta situación provocaría que el acuífero inferior después de la Falla se encuentre alojado en rocas volcánicas de baja permeabilidad lo que contribuirá a una mayor permanencia del agua en el acuífero inferior, elevando así sus concentraciones de sus elementos mayores y menores como también la concentración de STD producto de la interacción agua roca.

## 6.6 Clasificación hidroquímica

La clasificación de las muestras de agua para redes de pozos ADLS, MC y DMH se realizó según diagramas de Piper, es decir se obtuvo información sobre el tipo de agua según la concentración de iones y aniones mayoritarios. De acuerdo de la anterior, la mayoría de las muestras pertenecen a la facie hidroquímica clorurada sódica. Existen diferencias en cuanto a la concentración de los cationes en las aguas superficiales, del acuífero inferior y superior, aun así, no se puede concluir diferencias sobre su origen sin estudiar antes la interacción agua roca, ya que esto podría modificar la composición inicial de las aguas entregando información errada sobre distintos orígenes. Por lo cual se analizan los diagramas de Piper de forma separada para las distintas redes de pozos.

Además, es importante tener en cuenta que estos triángulos muestran solo las proporciones entre los aniones o cationes mayores, no sus concentraciones absolutas, por lo cual también se consulta el resumen del análisis hidroquímico en el *anexo A* (tabla 11 a 14) con el fin de concluir de manera más acertada.

### 6.6.1 Diagrama de Piper ADLS

#### Acuífero superior y aguas superficiales

En la figura 6.28 se presenta un diagrama de Piper, el cual muestra la composición relativa de cada punto de **agua superficial y del acuífero superior**.

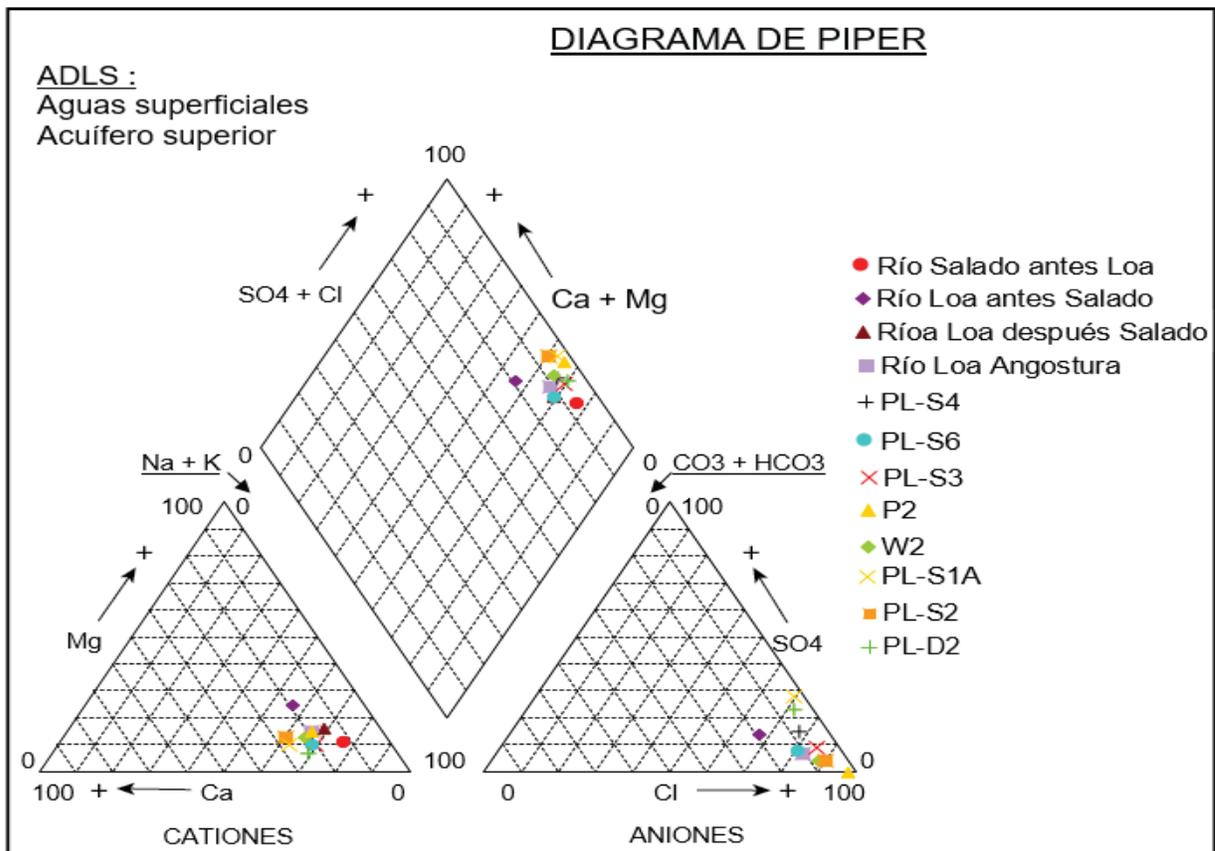


Figura 6.28: Diagrama de Piper red de pozos ADLS muestras de agua superficial y acuífero superior.

La composición de las muestras de **agua superficial** permite agruparlos en una facie hidroquímica correspondiente a aguas cloruradas-sódicas. Existen 2 fuentes principales: el río Loa proveniente de la alta cordillera el cual se asocia al flujo 1 y el río Salado asociado a flujo geotermal del Tatio (flujo2). Ambos ríos se juntan en las cercanías de Chiu Chiu. Lo que se observa en el diagrama de Piper es que todas las muestras ubicadas posterior a la confluencia de los ríos muestran una facie similar a las muestras del río Salado. Si bien el río Loa antes de su junta con el río Salado también tiene una facie clorurada sódica, sus muestras se encuentran más cercanas al extremo magnésico.

Para las muestras del **acuífero superior** su huella hidroquímica clorurada sódica es similar a las muestras del río Salado asociadas al sistema geotermal del Tatio donde las concentraciones de los cationes y aniones son bastante similares.

El comportamiento de los aniones es algo diferente donde el sulfato aumenta progresivamente en relación con los demás aniones. Sería un error intentar buscar un proceso de disolución o intercambio iónico asociado al aumento de  $SO_4$  ya que las muestras P2, W2, PL-D2 y PLS1A son aguas de distinto origen, ya que reciben una descarga desde el **acuífero inferior**. Por lo que restarían los pozos PLS4, PLS6 Y PLS3 que presentan composiciones similares ya que son pozos de someros, de profundidades similares y geográficamente cercanos entre sí.

### Acuífero inferior

En la *figura 6.29* se presenta un diagrama de Piper, el cual muestra la composición relativa de muestras pertenecientes al **acuífero inferior**.

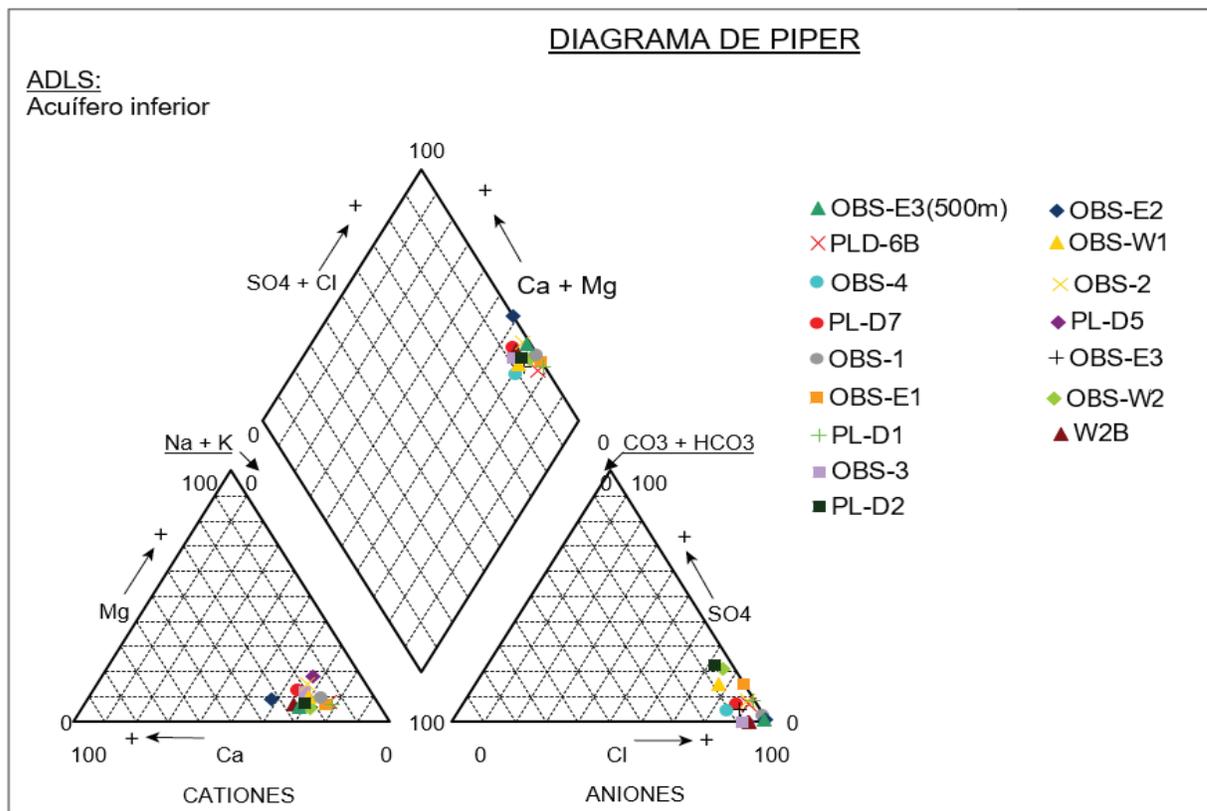


Figura 6.29: Diagrama de Piper red de pozos ADLS muestras de agua acuífero inferior.

Nuevamente, los puntos exhiben una tendencia marcada, ya que todas las muestras grafican en la zona que corresponde a la facie clorurada-sódica, este resultado es satisfactorio, asumiendo que el origen de las aguas asociadas al acuífero inferior en Pampa Llalqui son de origen geotermal y se asocian a los Geiser del Tatio.

Se observa una leve tendencia en el aumento de ion sulfato, lo que podría ser resultado de una mayor influencia desde fuentes sódico-sulfatadas, las cuales son documentadas en estudios previos (Cortecchi, 2005).

### 6.6.2 Diagrama de Piper MC

#### Acuífero superior y aguas superficiales

En la *figura 6.30* se presenta un diagrama de Piper, en el cual se grafica la composición relativa de las muestras de agua superficial y acuífero superior de la red de pozos de Minera Centinela.

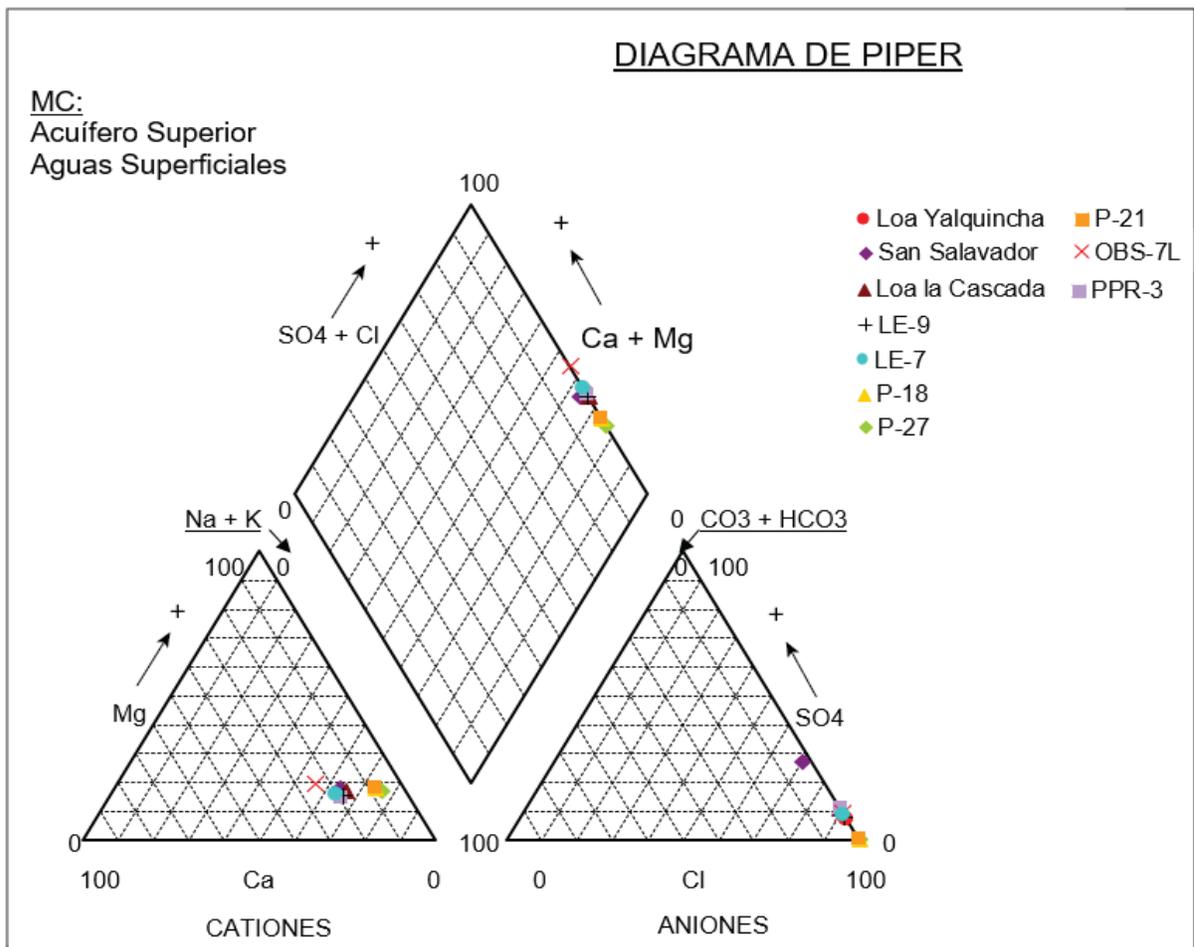


Figura 6.30: Diagrama de Piper red de pozos MC muestras de agua superficial y acuífero superior.

A diferencia de las redes de pozos DMH y ADLS, los pozos de MC se limitan a un área más pequeña, por lo que es complejo definir líneas de flujos haciendo referencia a cambio de composicionales según su ubicación.







# Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

## 7.1 Conclusiones

En el presente trabajo se realizó un análisis con información perteneciente a la red de pozos de ADLS, MC y DMH, las cuales se encuentran distribuidas en la cuenca de Calama. Además, se utilizó información complementaria de investigadores independientes, la cuales fueron detalladas en la sección de referencias (Anexo A). Para la conceptualización de los flujos se recopiló información referente a la habilitación de pozos, y parámetros que estos median, tales como niveles piezométricos, calidad del agua, en particular análisis isotópico y concentración de STD. Con el fin de integrar dicha información, y así realizar una conceptualización de los flujos presentes en la cuenca, que permita distinguir los distintos flujos, la composición química en su origen.

Del análisis de los niveles de agua se obtuvo un mapa de isopiezas, el cual permitió identificar 3 flujos, a los cuales se asocian distintas composiciones químicas e isotópicas. Dichos flujos serán los encargados de sustentar a los recursos hídricos de la cuenca, y caracterizarán al acuífero superior e inferior según a qué zona de estudio correspondan.

- Flujo 1: Corresponde al flujo regional noreste el cual proviene directamente de las partes altas de la cuenca, presenta una composición isotópica inicial en rangos de -11.9 a -11.2 para  $\delta^{18}O$  y -91 y -87 para  $\delta^2dH$ . Estas razones isotópicas se van enriqueciendo progresivamente a media que se avanza en dirección Noreste hasta la ciudad de Calama.  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2dH$
- Flujo 2: El flujo 2 se asocia al sistema geotermal del Tatio, este presenta una composición considerablemente más pesada en relación con los demás flujos, producto de su impronta geotermal alcanza valores de hasta -3 y -70 para  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2dH$  respectivamente. A medida que el flujo avanza en dirección Oeste su composición isotópica se vuelve más empobrecida producto de la influencia del flujo 1.
- Flujo 3: Presenta composiciones intermedias entre los flujos 1 y 2, su composición isotópica varía producto de la mezcla en distintas razones de los flujos 1 y 2.

Es de suma importancia destacar, que los flujos cambiarán su composición inicial desde su fuente de origen. Ya que la composición de los flujos queda determinada por su tiempo de permanencia en el acuífero, el tipo de litología encargada de hospedar al acuífero, influencia de estructuras locales y por la conexión hidráulica que pudiese existir entre el acuífero superior e inferior.

Finalmente se debe considerar además en la razón que los flujos principales se mezclen, también es importante mencionar el factor antrópico ya que producto de infiltración de aguas industriales las composiciones de las aguas pueden variar de forma considerada.

A partir de la conceptualización realizada, se dependen lo siguiente:

- Para la zona de Pampa Llalqui, existe un acuífero superior e inferior, junto a un acuitardo que los separa. Las aguas del acuífero superior poseen una razón isotópica intermedia a liviana, que consiste en la mezcla entre los flujos 1 y 2, además de que existe una estrecha conexión hidráulica entre el río Loa y el acuífero superior. Este último se caracteriza por concentraciones de As relativamente mayores, a diferencia del acuífero inferior que presenta concentraciones relativamente bajas. En el caso de que el acuífero inferior presente concentraciones de arsénico más elevadas será producto de las conexiones hidráulicas existentes. La conexión hidráulica entre el acuífero superior e inferior en Pampa Llalqui ocurre a través de una falla inferida o una barrera hidráulica, la cual interrumpe el flujo del acuífero inferior, haciendo que descargue sobre el acuífero superior y la superficie.

Por lo que se concluye que el acuífero superior está sustentado por aguas provenientes desde los dos flujos (1 Y 2), de composiciones químicas e isotópicas intermedias (similares al río Loa). A diferencia del acuífero superior, el acuífero inferior está netamente sustentado por el flujo proveniente desde el sistema regional el Tatio, el cual se caracteriza por una composición isotópica más pesada y una cantidad de STD mayor, por encontrarse mayor profundidad y estar sustentado por un sistema geotermal

- Para la red de pozos minera Centinela, hay cambios en cuanto a las formaciones que albergan los acuíferos, pero a pesar de esto, siguen presente el acuífero superior e inferior. Por su parte la zona se ve influenciada por un alto control estructural de la Falla Oeste, la cual pone terminación a las unidades que contienen al acuífero inferior produciendo la descarga de este en el acuífero superior. Lo anterior deja en evidencia nuevamente la conexión hidráulica entre el acuífero superior e inferior.

Los flujos provenientes desde el sistema regional el Tatio (flujo 2) se verán interrumpidos, al igual que el flujo central (que es la mezcla del flujo 1 y 2) por el alto control estructural. Por lo que se concluye que el acuífero inferior en el sector de MC después de la falla estará solo sustentado por el flujo regional que proviene desde el noreste, lo cual fue corroborado desde el punto de vista químico e isotópico. Dicha situación permite corroborar la desconexión hidráulica del acuífero inferior presente en el sector de Minera Centinela con el acuífero inferior en la zona de Pampa Llalqui.

- Para la red de pozos DMH, los distintos acuíferos se encuentran en las litologías identificadas principalmente al noreste y al oeste del río Loa . Al igual que en todos los demás, el acuífero superior posee una fuerte conexión hidráulica con las aguas superficiales, debido a que la signatura isotópica de las muestras de agua del acuífero superior es muy similar a la composición isotópica del río Loa en angostura. Debido a esto se concluye que él está sustentado por el flujo que proviene 1 y 3.

En cuanto el acuífero inferior se observa composición isotópica más liviana y el aumento progresivo de los STD en dirección Suroeste. Desde el punto de vista químico e isotópico se concluye que el flujo que sustenta el acuífero inferior en la zona de DMH, es el flujo 1 y 3.

- Finalmente, en relación a los puntos expuestos anteriormente, se concluye que existe una desconexión hidráulica por parte del acuífero inferior en Pampa Llalqui con el acuífero que sustenta a la cuenca de Calama, la cual estaría respaldada por los análisis químicos e isotópicos. Ya que al separarlos en grupos según su composición isotópica y químicas estos muestran tendencias y se agrupan en relación al mismo origen. Es importante destacar, que los pozos que presenten anomalías isotópicas fuera de lo normal, será producto conexiones hidráulicas producto de estructuras o falta de continuidad del acuitardo, infiltración o contaminación proveniente desde actividades mineras.

## **7.2 Recomendaciones**

De acuerdo con las conclusiones antes mencionadas, se generan las siguientes recomendaciones:

Se recomienda trabajar con una mayor densidad de datos para toda la cuenca, ya que al sur del río Loa en la zona de Angostura, existen solo dos pozos, por lo cual se pierde mucha información sobre la química, isótopos, niveles de agua y estratigrafía entre Pampa Llalqui y el sector de Minera Centinela. De igual manera se recomienda un análisis químico completo de todos los pozos, ya que la existencia de información con respecto a isótopos y química se ve limitada netamente por la falta de análisis químicos en los distintos pozos en la cuenca pertenecientes tanto a MC como a DMH.

También se sugiere utilización de información más reciente y que se acote a un tiempo menor, para obtener mejores interpretaciones. Como también se sugiere que los análisis químicos sean realizados por los mismos laboratorios y se estandarice los parámetros que se medirán y la forma en que estos serán expuestos en los informes (en función de la norma chilena), ya que se trabajó con análisis de distintos laboratorios y estos no siempre contaban con la misma información registrada.

Para concluir finalmente, el trabajo representa en forma general, la conceptualización química de los distintos acuíferos según la zona de estudio. Además del apoyo de los distintos flujos que sustentan los recursos hídricos de las cuencas. Esta conceptualización puede ser usada con posterioridad, para demostrar la desconexión hidráulica que existe entre el acuífero inferior de pampa Llalqui con los acuíferos de la cuenca del Loa medio, apoyándose en simulaciones de pruebas de bombeo en distintos escenarios.

## Bibliografía

- Aravena, R., & Suzuki, O. (1990).** Isotopic evolution of river water in the northern Chile region. *Water Resources Research*, 26(12), 2887-2895.
- Blanco, N. (2008).** Estratigrafía y evolución tectono-sedimentaria de la cuenca cenozoica de Calama (Chile, 22 S). *Masterarbeit, Universidad de Barcelona*.
- Blanco, N., & Tomlinson, A. J. (2009).** *Carta Chiu Chiu: región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Cappa, C. D., & DePaolo, D. J. (2004).** Kinetic  $^{17}\text{O}$  effects in the hydrologic cycle: Indirect evidence and implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(17), 3487-3495.
- Cappa, C. D., Hendricks, M. B., DePaolo, D. J., & Cohen, R. C. (2003).** Isotopic fractionation of water during evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D16).
- Clark, I. D., & Fritz, P. (1997).** *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC press.
- Codelco. (2016).** *Informe plan se vigilancia ambiental de aguas División Ministros Hales*. Santiago.
- Codelco Chile. (2005).** *Proyecto Mansa Mina, Estudio de impacto Ambiental*. Santiago: Knight Piésold S.A.
- Cortecchi, G., Boschetti, T., Mussi, M., Lameli, C. H., Mucchino, C., & Barbieri, M. (2005).** New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile. *Geochemical Journal*, 39(6), 547-571.
- Craig, H. (1961).** Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976).** *Hidrología subterránea* (Vol. 1). Barcelona: Omega.
- DGA. (1980).** *Hoyas hidrográficas de Chile, 2da región de Antofagasta*. Antofagasta.
- DGA. (2003).** *Modelación hidrogeológica, sector Pampa Llalqui, cuenca río Loa, II región de Antofagasta*. Antofagasta.
- DGA. (2004).** *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua, según objetivos de calidad*. Santiago: Cade-Idepe.
- DGA. (2005).** *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Antofagasta: Consultores cade-idepe.
- DGA. (2012).** *Estudio acuífero de Calama, sector medio del río Loa, región de Antofagasta*. Antofagasta: Matraz consultores asociados S.A.
- DGA. (2013).** *Levantamiento información hidrogeológica región de Antofagasta*. Santiago: Mayco consultores.
- DGA. (2014).** *Análisis integrado río Loa, región de Antofagasta*. Santiago: Knight Piésold.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology* (Vol. 506). New York: Wiley.
- Fuentes Carrasco, F.C. (2009).** *Simulación hidrogeológica de la explotación del acuífero freático ubicado en la Formación Opache, II Región, Norte de Chile [M.S. thesis]: Santiago, Universidad de Chile, pag 76*
- García, F. (2015).** GEOLOGIA DEL NORTE GRANDE DE CHILE., pag 138.
- Gonfiantini, R., Roche, M. A., Olivry, J. C., Fontes, J. C., & Zuppi, G. M. (2001). The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chemical Geology*, 181(1), 147-167.
- Hounslow, A. (1995).** *Water quality data: analysis and interpretation*. CRC press.
- Jordan, T., Lameli, C. H., Kirk-Lawlor, N., & Godfrey, L. (2015).** Architecture of the aquifers of the Calama Basin, Loa catchment basin, northern Chile. *Geosphere*, GES01176-1.
- Kendall, C., Sklash, M. G., & Bullen, T. D. (1995).** Isotope tracers of water and solute sources in catchments. *Solute modelling in catchment systems*, 261-303.

- Knight Piésold S.A. (2004).** *Estudio de impacto ambiental proyecto Mansa Mina.* Santiago, Chile.
- May, G., Hartley, A. J., Chong, G., Stuart, F., Turner, P., & Kape, S. J. (2010).** Eocene to Pleistocene lithostratigraphy, chronostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of the Calama Basin, northern Chile. *Andean Geology*, 32(1), 33-58.
- Minera Centinela. (2015).** *Informe Trimestral de Isotopía, Cuatro trimestre 2015.* Antofagasta.
- Minera Centinela. (2016).** *Informe trimestral química y calidad de aguas, primer trimestre 2016.* Santiago.
- Minera Centinela. (2016).** *Informe trimestral niveles y caudales, primer trimestre 2016.* Santiago.
- Minera El Tesoro. (2010).** *Plan de alerta temprana, habilitación sectorial pozo P-10.*
- Mook, W., & Rozanski, K. (2000).** Environmental isotopes in the hydrological cycle. *IAEA Publish*, 39. Santiago.
- Mpodozis, C., Marinovic, N., Smoje, I., & Cuitiño, L. (1993).** Estudio Geológico-Estructural de la Cordillera de Domeyko entre Sierra Limón Verde y Sierra Mariposas, Región de Antofagasta. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado*, (4).
- Mugai, P., Shiundu, P. M., Mwaura, F. B., & Kamau, G. N. (2010).** Correlation between dissolved oxygen and total dissolved solids and their role in the eutrophication of Nairobi Dam.
- Naranjo, J. A., & Paskoff, R. P. (2010).** Estratigrafía de los depositos cenozoicos de la region de chiuchiu-calama. desierto de atacama. *Andean Geology*, (13-14).
- Nazca S.A (2002).** Pampa Llalqui, Investigación y Evaluación Hidrogeológica. Nazca S.A. Diciembre 2002.
- Pananont, P., Mpodozis, C., Blanco, N., Jordan, T. E., & Brown, L. D. (2004).** Cenozoic evolution of the northwestern Salar de Atacama Basin, northern Chile. *Tectonics*, 23(6).
- Pérez, G. R., & Restrepo, J. J. R. (2008).** *Fundamentos de limnología neotropical* (Vol. 15). Universidad de Antioquia.
- Rau, J. R., Zuleta, C., Gantz, Saiz, Cortes, A., Yates & Couve, E. (1998).** Biodiversidad de artrópodos y vertebrados terrestres del Norte Grande de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 71, 527-554.
- Rochat, P. (2000).** *Structures et cinématique de l'Altiplano Nord-Bolivien au sein des Andes Centrales* (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
- Sharp, Z. (2007).** *Principles of stable isotope geochemistry* (p. 344). Upper Saddle River, NJ: Pearson education.
- Schneider, S. H., & Hare, F. K. (1996).** *Encyclopedia of climate and weather* (Vol. 678). New York: Oxford University Press.
- Teillier, S. (2004).** La vegetacion de la cuenca media-alta del rio Loa (3100-4150 msnm). Región de Antofagasta (II), Chile. *Chloris Chilensis*, 7(2).
- Tomlinson, A. J., Blanco, N., Maksaev, V., Dilles, J. H., Grunder, A. L., & Ladino, M. (2001).** Geología de la Precordillera Andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata, Regiones I y II (20 30'–22 30' S). *Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago-Chile*, 1-444.
- Tomlinson, A., Blanco, N., García, M., Baez, L., Alcota, H., Ladino, M., ... & Martin, M. (2012).** Permian exhumation of metamorphic complexes in the Calama area: Evidence for flat-slab subduction in northern Chile during the San Rafael tectonic phase and origin of the Central Andean gravity high. In *XIII Congreso Geológico de Chile, Actas, T2* (pp. 209-211).

- Torres, A. (2010).** *Caracterización Geotécnica/Hidrogeológica Mina Chuquicamata.* Antofagasta: Tesis.
- Vai Groundwater Solutions. (2013).** *Modelo conceptual hidrogeológico, Pampa Llalqui.* Santiago.
- Vai Groundwater Solutions. (2016).** *Actualización modelo conceptual hidrogeológico y modelo numérico, Pampa Llalqui.* Santiago

## **Anexos**

### **Anexo A: Tablas**

Tabla 1: Información de niveles piezométricos, pozos habilitados en acuífero superior.

Pozos con información sobre niveles piezométricos acuífero superior					Sistema de coordenadas UTM WGS84 19S				
Nombre	Empresa	Norte	Este	NP[m]	Nombre	Empresa	Norte	Este	NP[m]
LE-4	MC	7515406.38	502631.85	2189.89	W3	ADLS	7524169.25	549807.88	2546.61
LE-6	MC	7515973.71	503045.43	2195.74	W5	ADLS	7515766.44	537431.13	2488.9
LE-7	MC	7514733.23	503840.1	2211.34	W6	ADLS	7513836	535179.18	2477.81
LE-9	MC	7515706	505381.4	2220.59	PLL-SS01	ADLS	7516295.33	530059.07	2464.65
OBS-7L	MC	7513701	500486	2153.74	PLL-SS02	ADLS	7516245.84	529822.02	2464.69
P-7	MC	7514286.02	503407.82	2203.62	PLL-SS03	ADLS	7518230.31	530323.92	2464.14
P-18	MC	7514877.12	503884.99	2212.19	PLL-SS04	ADLS	7516757.06	529806.95	2461.86
P-19	MC	7514504.46	503884.99	2205.45	PLL-SS05	ADLS	7519080.07	529723.59	2468.83
P-24	MC	7514587.38	504107.12	2208.93	PLL-SS06	ADLS	7516700.16	529483.11	2461.46
P-25	MC	7514141.94	503712.39	2204.6	PLL-SS07	ADLS	7516180.29	529999.41	2464.98
P-27	MC	7513953.18	503840.73	2204.45	PLL-SS08	ADLS	7516870.48	530299.38	2468.93
PPR-1	MC	7515126.81	504392.75	2217.69	PLL-SS09	ADLS	7516350.64	529805.98	2464.49
PPR-4	MC	7514703.11	503864.88	2211.24	PLL-SS10	ADLS	7516260.36	529977.21	2465.05
E1	ADLS	7525163.24	543448.01	2521.12	TL-02C	DMH	7521934.08	520745.188	2447.31
E2	ADLS	7512276.51	530088.29	2467.07	TL-03C	DMH	7522561.25	524284.243	2459.45
E3	ADLS	7517940.39	544856.98	2507.21	TL-03C	DMH	7522561.25	524284.243	2459.45
P2	ADLS	7517565	534519.2957	2477.27	TL-07C	DMH	7520565	527167.732	2469.98
PL-D2	ADLS	7517469.07	532471.99	2470.38	TL-09C	DMH	7520747.5	529263.798	2473.45
DC-1	ADLS	7516753.84	532905.46	2466.57	TL-11C	DMH	7524024.85	517888.268	2404.45
DC-2	ADLS	7516632.03	536019.98	2484.98	TL-28C	DMH	7518138.46	514799.533	2244.18
DC-3	ADLS	7522131.55	541260.57	2507.93	CC-2	DMH	7521503.79	507967.028	2278
PL-S1A	ADLS	7514943.63	530038.53	2466.87	CC-5	DMH	7520518.45	509916.856	2281.86
PL-S1B	ADLS	7514940.87	530045.81	2466.86	CC-7	DMH	7519335.59	510385.186	2284.32
PL-S2	ADLS	7517460.06	532468.8	2470.67	CC-9	DMH	7520447.29	508297.79	2262.8
PL-S3	ADLS	7521467.29	533971.94	2477.64	CC-15	DMH	7513422.61	500317.769	2276.9
PL-S4	ADLS	7524891.87	536986.55	2495.86	CC-17	DMH	7529948.41	506872.421	2293.5
PL-S6	ADLS	7522877.89	535920.62	2489.2	CC-18	DMH	7522072.61	509377.498	2308.7
Px	ADLS	7522707	542029.04	2503.78	SI-8C	DMH	7518877.94	505856.83	2265.96
W1	ADLS	7515021.45	532433.24	2476.09	SI-23C	DMH	7519891.49	507144.075	2236.31
W2	ADLS	7519313	537591	2496.23	Aeropuerto	DGA	7510760	514250	2364.76

Tabla 2: Información de niveles piezométricos, pozos habilitados en acuífero inferior.

Pozos con información sobre niveles piezométricos acuífero inferior					Coordenadas UTM WGS84 19S				
Nombre	Empresa	Norte	Este	NP[m]	Nombre	Empresa	Norte	Este	NP[m]
OBS-6Li	MC	7515706.42	503864.88	2213.74	OBS-W1	ADLS	7515019.68	532414.97	2475.92
LE-2	MC	7516811.3	503126.88	2165.64	OBS-W2	ADLS	7518766.17	537380.78	2495.77
OBS-6C	MC	7515729.58	505389.22	2168.73	PL-D1	ADLS	7514948.28	530044.3	2463.53
OBS-7C	MC	7513699.5	500481.32	2104.23	PL-D2	ADLS	7517469.07	532471.99	2470.38
OBS-8C	MC	7514298.2	503399.7	2126.83	PL-D5	ADLS	7509729.78	521839.15	2383.64
OBS-9C	MC	7514891.73	503886.95	2149.57	PL-D6A	ADLS	7522853.86	535951.35	2486.63
OBS-11C	MC	7513232.77	498646.3	1988.58	PL-D7	ADLS	7513919.14	516717.8	2336.08
P-10	MC	7514207.64	503462.12	2056.26	ARMH-1	DMH	7522129.96	513778.155	2398.7
PBC-1	MC	7514709.42	502878.53	2146.51	CHU-45	DMH	7525458.06	509687.552	2286.54
PBC-2	MC	7514545.57	502325.96	2144.43	CHUCA-5	DMH	7520837.12	510103.102	2438.15
DC-1	ADLS	7516753.84	532905.46	2565.75	CC-1	DMH	7521522.05	507977.597	2278
DC-2	ADLS	7516632.03	536019.98	2641.69	CC-3	DMH	7519856.47	506890.44	2249.26
DC-3	ADLS	7522131.55	541260.57	2507.93	CC-4	DMH	7520550	509911.946	2281.86
OBS-1	ADLS	7513003.09	530678.06	2522.85	CC-6	DMH	7519366.27	510417.266	2284.32
OBS-2	ADLS	7514442.97	533858.38	2477.98	CC-8	DMH	7520433.8	508259.591	2262.8
OBS-3	ADLS	7519814.21	538459.94	2503.19	CC-12	DMH	7515772.38	503069.681	2101.78
OBS-4	ADLS	7519297.68	542141.26	2496.94	CC-14	DMH	7513441.19	500339.139	2142.16
OBS-E1	ADLS	7525175.25	543451.71	2520.87	CC-16	DMH	7522084.1	509379.778	2234.27
OBS-E2	ADLS	7512272.51	530078.29	2541.1	PBMM-4	DMH	7523053.77	509033.225	2224.19
OBS-E3	ADLS	7517563.49	534715	2599.45					

Tabla 3: Información isotópica, aguas superficiales. y pozos habilitados en el acuífero superior e inferior.

Muestras con información de razón isotópica UTM WS84 19S					
Nombre	Ubicación	$\delta^2H$	$\delta^{18}O$	Norte	Este
SI-6B	Acuífero Inferior	-61.2	-6.64	7525189.11	513380.559
PBMM-3	Acuífero Inferior	-34.4	0.38	7523375.82	510454.331
SR-4	Acuífero Inferior	-78.5	-10.42	7531938.58	507797.922
SI-27E	Acuífero Inferior	-62.1	-8.38	7520549.7	527133.553
SI-5D	Acuífero Inferior	-73.7	-9.99	7531134.88	530452.946
SI-26E	Acuífero Inferior	-73.8	-9.97	7531231.25	526524.07
SE-3	Acuífero Inferior	-69.4	-9.02	7526866.25	531003.883
TL-17D	Acuífero Inferior	-71.8	-9.77	7525116.43	529220.62
SI-25E	Acuífero Inferior	-66.5	-8.34	7533295.82	519793
TL-15	Acuífero Inferior	-69.0	-9.33	7521993.27	522377.793
TL-24	Acuífero Inferior	-64.3	-8.39	7517782.7	523559.797
SI-35E	Acuífero Inferior	-20.4	1.85	7523016.84	512415.854
TL-26C	Acuífero Inferior	-65.0	-7.49	7520115.05	517024.696
SE-5B	Acuífero Inferior	-72.7	-8.77	7518319.07	514181.756
SI-7B	Acuífero Inferior	-70.0	-9.33	7522874.19	513380.558
SI-13C	Acuífero Inferior	-71.9	-9.68	7528320.36	517929.368
PBMM-7	Acuífero Inferior	-66.3	-8.55	7521761.1	511466.034
SI-3B	Acuífero Inferior	-59.1	-6.03	7526918.71	512538.592
CHU-26B	Acuífero Inferior	-61.0	-7.10	7536747.02	530631.409
SI-37E	Acuífero Inferior	-73.1	-9.95	7532747.08	532893.235
SI-5B	Acuífero Inferior	-70.0	-8.25	7531134.89	513736.84
TL-25	Acuífero Inferior	-74.7	-10.02	7523369.67	531773.59
TL-22	Acuífero Inferior	-72.6	-9.83	7523388.28	526497.367
SI-9E	Acuífero Inferior	-68.4	-8.43	7517578.33	513661.627
SI-8E	Acuífero Inferior	-67.0	-8.58	7519173.23	512272.586
SI-2B	Acuífero Inferior	-63.8	-6.84	7526438.36	513201.948
SI-1B	Acuífero Inferior	-59.7	-6.19	7526234.81	513700.927
PBMM-1	Acuífero Inferior	-72.1	-8.67	7526734.19	509513.716
CHUCA-10B	Acuífero Inferior	-70.5	-8.68	7525288.01	508888.908
CHUCA-6B	Acuífero Inferior	-68.9	-8.19	7521006.03	507770.052
TL-31D	Acuífero Inferior	-70.5	-9.48	7528186.37	519067.264
PBMM-4	Acuífero Inferior	-72.2	-9.07	7523053.77	509033.225
SI-24E	Acuífero Inferior	-66.3	-8.37	7519911.51	507050.187
CHUCA-7B	Acuífero Inferior	-58.2	-7.80	7515705.92	507998.276
SI-11C	Acuífero Inferior	-74.3	-10.02	7534886.99	527288.173
ARMH-3	Acuífero Inferior	-49.3	-5.08	7520148.94	513296.915
ARMH-1	Acuífero Inferior	-69.1	-9.15	7522129.96	513778.155
SI-10B	Acuífero Inferior	-70.5	-9.42	7524406.54	512598.59
SI-15E	Acuífero Inferior	-61.5	-6.66	7526146.49	511490.834
SI-20E	Acuífero Inferior	-71.7	-9.62	7528362.52	516116.747

Tabla 4: Información isotópica, aguas superficiales. y pozos habilitados en el acuífero superior e inferior

<b>Pozos con información de razón isotópica UTM WGS84</b>					
<b>Nombre</b>	<b>Ubicación</b>	<b><math>\delta^2H</math></b>	<b><math>\delta^{18}O</math></b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>
SI-33E	Acuífero Inferior	-67.6	-8.87	7519682	519746
SI-8C	Acuífero Superior	-64.2	-8.39	7518878	505857
SI-22C	Acuífero Superior	-71.8	-9.71	7529982	519866
SI-18C	Acuífero Superior	-47.2	-4.05	7521464	505856
TT-4E	Acuífero Superior	-70.5	-9.22	7525116	523912
TL-10C	Acuífero Superior	-76.6	-10.22	7522573	528215
TL-09C	Acuífero Superior	-68.4	-9.10	7520748	529264
TL-03C	Acuífero Superior	-62.6	-7.46	7522561	524284
TL-07C	Acuífero Superior	-73.3	-9.75	7520565	527168
TL-8C	Acuífero Superior	-56.7	-8.08	7516785	527648
TL-02C	Acuífero Superior	-67.2	-7.86	7521934	520745
SI-14E	Acuífero Superior	-51.8	-5.16	7524650	517872
SI-20C	Acuífero Superior	-52.8	-5.42	7518319	517220
SI-19C	Acuífero Superior	-66.5	-8.52	7526349	516063
SI-15C	Acuífero Superior	-64.5	-7.93	7525633	514169
SI-21C	Acuífero Superior	-71.1	-9.65	7528363	517991
SI-8C	Acuífero Superior	-64.2	-8.39	7535991	578084
SI-18C	Acuífero Superior	-47.2	-4.05	7521816	512003
SI-21C	Acuífero Superior	-71.1	-9.65	7528363	517991
TT-4E	Acuífero Superior	-70.5	-9.22	7525116	523912
TL-10C	Acuífero Superior	-76.6	-10.22	7522573	528215
TL-09C	Acuífero Superior	-68.4	-9.10	7520748	529264
TL-03C	Acuífero Superior	-62.6	-7.46	7522561	524284
TL-07C	Acuífero Superior	-73.3	-9.75	7520565	527168
TL-02C	Acuífero Superior	-67.2	-7.86	7521934	520745
SI-21C	Acuífero Superior	-71.1	-9.65	7528363	517991
RLL	Superficial	-53.0	-7.08	7525682	535268
RLN	Superficial	-54.7	-7.37	7517328	520603
V-2-SUR	Superficial	-48.3	-7.01	7516376	527247
RLM	Superficial	-54.2	-7.31	7516516	514802
V-9	Superficial	-57.0	-8.13	7516504	527508
RLL	Superficial	-53.0	-7.08	7525682	535268
RLJ	Superficial	-62.9	-7.88	7526204	535540
Chiu-Chiu	Superficial	-61.3	-7.72	7513686	535891
RLF	Superficial	-84.7	-11.39	7605329	574881
Salado Chico	Superficial	-51.4	-5.57	7534290	584612
RLK	Superficial	-45.6	-6.30	7526163	535843
RSSA	Superficial	-56.8	-7.48	7513686	500346
AD-1170	Superficial	-64.1	-8.05	7519621	505905
RSSB	Superficial	-73.7	-9.80	7513521	496771
DTT	Superficial	-46.0	-3.68		
ZAC	Superficial	-47.9	-4.44		

Tabla 5: Información isotópica, aguas superficiales. y pozos habilitados en el acuífero superior e inferior.

<b>Pozos con información de composición isotópica UTM WGS84</b>					
<b>Nombre</b>	<b>Ubicación</b>	<b><math>\delta^2H</math></b>	<b><math>\delta^{18}O</math></b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>
Río Loa después de Río Salado	Superficial	-54.1	-7.4	7526038	535403
Río Loa después de Río Salado	Superficial	-57.5	-7.5	7526038	535403
Río Loa después de Río Salado	Superficial	-54.2	-7.3	7526038	535403
Río Loa después de Río Salado	Superficial	-57.2	-7.8	7526038	535403
Río Loa después de Río Salado	Superficial	-56.8	-7.7	7526038	535403
Río Loa después de Río Salado	Superficial	-52.0	-7.2	7526038	535403
Río Salado antes Río Loa	Superficial	-50.3	-7.1	7526097	535700
Río Salado antes Río Loa	Superficial	-46.9	-6.7	7526097	535700
Río Salado antes Río Loa	Superficial	-45.5	-6.4	7526097	535700
Río Salado antes Río Loa	Superficial	-47.6	-6.5	7526097	535700
Río Salado antes Río Loa	Superficial	-47.1	-6.4	7526097	535700
Río Salado antes Río Loa	Superficial	-50.6	-7.0	7526097	535700
Río Salado antes Río Loa	Superficial	-47.6	-6.5	7526097	535700
Río Salado antes Río Loa	Superficial	-51.9	-7.1	7526097	535700
Río Salado antes Río Loa	Superficial	-48.4	-7.0	7526097	535700
PL-D1	Acuífero Inferior	-50.9	-6.1	7514948	530044
PL-D1	Acuífero Inferior	-50.7	-6.0	7514948	530044
PL-D1	Acuífero Inferior	-50.0	-6.0	7514948	530044
PL-D1	Acuífero Inferior	-49.5	-5.5	7514948	530044
PL-D1	Acuífero Inferior	-49.7	-5.7	7514948	530044
PL-D1	Acuífero Inferior	-47.3	-5.8	7514948	530044
PL-D1	Acuífero Inferior	-46.6	-5.6	7514948	530044
OBS-W2	Acuífero Inferior	-50.0	-6.4	7514948	537381
OBS-W2	Acuífero Inferior	-49.3	-6.6	7514948	537381
OBS-W2	Acuífero Inferior	-47.1	-6.5	7514948	537381
OBS-W2	Acuífero Inferior	-46.0	-6.4	7514948	537381
OBS-W2	Acuífero Inferior	-46.6	-6.6	7514948	537381
OBS-W2	Acuífero Inferior	-46.5	-6.6	7514948	537381
OBS-W2	Acuífero Inferior	-45.6	-6.2	7514948	537381
E3	Acuífero Inferior	-47.9	-6.4	7517940	544857
OBS-E3, 500m	Acuífero Inferior	-24.3	-1.2	7517940	544866
OBS-E3, 500m	Acuífero Inferior	-24.3	-1.2	7517940	544866
P2	Acuífero Superior	-52.4	-7.7	7517563	534715
PL-S6	Acuífero Superior	-57.3	-8.1	7522878	535921
PL-S1A	Acuífero Superior	-53	-7.8	7514944	530039
PL-S1A	Acuífero Superior	-43	-5.9	7514944	530039
PL-S1A	Acuífero Superior	-44	-6.0	7514944	530039
PL-S1A	Acuífero Superior	-44	-5.8	7514944	530039
PL-S1A	Acuífero Superior	-52.7	-7.8	7514944	530039

Tabla 6: Información isotópica, aguas superficiales. y pozos habilitados en el acuífero superior e inferior.

<b>Pozos con información de composición isotópica UTM WGS84</b>					
<b>Nombre</b>	<b>Ubicación</b>	<b><math>\delta^2H</math></b>	<b><math>\delta^{18}O</math></b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>
Incaliri	Superficial	-91	-11.9	7563418.4	596176.93
Linzor	Superficial	-59	-9.2	7541034.9	600505.82
Caspana	Superficial	-43	-6	7529311.1	580918.22
El Tatio 1	Superficial	-71	-5.2	7525377.2	601376.79
El Tatio 2	Superficial	-69	-4.8	7525377.2	601376.79
El Tatio 4	Superficial	-66	-3	7525377.2	601376.79
El Tatio 5	Superficial	-65	-4.4	7525377.2	601376.79
El Tatio 6	Superficial	-67	-5.3	7525377.2	601376.79
El Tatio 7	Superficial	-66	-4.7	7525377.2	601376.79
El Tatio 8	Superficial	-65	-4.4	7525377.2	601376.79
Toconce	Superficial	-65	-9	7538221	601376.79
Conchi dam	Superficial	-74	-9.4	7564166	601376.79
Loa en angostura	Superficial	-62	-7.9	7516338.4	527031.35
Loa en angostura	Superficial	-56.5	-7.6	7516338.4	527031.35
Lequena	Superficial	-87	-11.2	7605551	534468
Loa antes de Conqui	Superficial	-73	-9.8	7567773	540359
Salado	Superficial	-45.5	-6.4	7526097.2	535700.17

Tabla 7: Información de STD, pozos pertenecientes al acuífero superior.

Pozos con información de STD, habilitados en acuífero superior					Coordenadas: UTM WGS84				
En los pozos pertenecientes a DMH con asterisco, la concentración de STD fue calculada como $CE \cdot 0.66$ (Hounslow, 1995)									
Nombre	Empresa	Norte	Este	SDT[ppm]	Nombre	Empresa	Norte	Este	SDT[ppm]
CC-9	DMH	7520447.29	508297.79	16856	OT-10*	DMH	7522474.3	513939.632	48000
CC-7	DMH	7519335.59	510385.186	3120	OT-11*	DMH	7522485.3	513951.631	1980
CC-15	DMH	7513422.61	500317.769	4832	OT-13*	DMH	7529514.15	527594.345	1740
CC-17	DMH	7529948.41	506872.421	3740	OT-14*	DMH	7524237.26	530639.28	1560
CC-18	DMH	7522072.61	509377.498	38828	OT-17*	DMH	7519338.37	510388.706	2820
CC-2	DMH	7521503.79	507967.028	25408	OT-18*	DMH	7523013.29	512411.664	39000
CC-5	DMH	7520518.45	509916.856	17440	OT-19*	DMH	7521698.31	527671.342	4800
TL-02C	DMH	7521934.08	520745.188	19080	OT-21*	DMH	7519344.36	526951.356	5400
TL-03C	DMH	7522561.25	524284.243	13340	P-21*	DMH	7514686.47	504219	4680
TL-06C	DMH	7522400.62	525899.769	9380	P-27*	DMH	7513953.18	503840.73	2520
TL-07C	DMH	7520565	527167.732	4684	PPR-3*	DMH	7515987	503042.14	3720
TL-09C	DMH	7520747.5	529263.798	4688	SI-16C*	DMH	7525261.24	514229.626	24000
TL-10C	DMH	7522573.46	528215.27	2572	SI-20C*	DMH	7524408.26	517220.563	13800
TL-11C	DMH	7524024.85	517888.268	14260	SI-22C*	DMH	7529982.14	519866.508	1740
TL-13C	DMH	7522800.31	514685.016	56844	TB-03*	DMH	7528244.18	519078.524	1620
TL-26C	DMH	7520115.05	517024.696	4268	TL-08C*	DMH	7516784.42	527648.341	3900
SI-13E	DMH	7523167.3	518293.701	12536	TL-25*	DMH	7523369.28	531773.255	2340
SI-14E	DMH	7524649.52	517871.789	16441	TL-29C*	DMH	7528869.16	528588.324	1380
SI-18C	DMH	7521463.73	505856.082	13756	TL-30c*	DMH	7522549.3	524276.413	8400
SI-23C	DMH	7519891.49	507144.075	10680	TL-31C	DMH	7522575.3	528235.33	1500
SI-8C	DMH	7518877.94	505856.83	4064	TL-31D*	DMH	7528186.18	519067.524	1620
LE-7	MC	7514733.23	503840.1	4500	TL-33D*	DMH	7521805.31	520242.498	4980
LE-9	MC	7515706	505381.4	4150	TL-34C*	DMH	7526044.22	530323.287	1380
OBS-7L	MC	7513701	500486	4490	TL-35C*	DMH	7534676.04	533064.232	1260
P-27	MC	7513953.18	503840.73	4770	TL-36C*	DMH	7515864.44	527986.333	7560
PPR-3	MC	7.515.987	503.042.14	3490	TR-01*	DMH	7524965.24	530847.275	1140
PL-S2 (38 m)	ADLS	7517460.06	532468.8	6980	TR-02*	DMH	7522580.3	528213.33	1440

Tabla 8: Información isotópica, aguas superficiales. y pozos habilitados en el acuífero superior e inferior.

Pozos con información de STD, habilitados en acuífero superior					Coordenadas: UTM WGS1984				
En los pozos de DMH con asterisco, la concentración de STD fue calculada como: (Conductividad eléctrica) *0.66 (Hounslow, 1995)									
Nombre	Empresa	Norte	Este	SDT[ppm]	Nombre	Empresa	Norte	Este	SDT[ppm]
PL-S1A (100 m)	ADLS	7514943.63	530038.53	10500	TR-04*	DMH	7521713.31	529199.309	3240
PL-S1B (39 m)	ADLS	7514940.87	530045.81	8731.8	TR-05*	DMH	7526253.22	530251.288	1500
PL-D2 (256 m)	ADLS	7517469.07	532471.99	12200	TR-06*	DMH	7522347.3	526763.361	3960
PL-S3 (35 m)	ADLS	7521467.29	533971.94	3090	TR-07*	DMH	7523243.28	522895.443	19200
PL-S4 (44 m)	ADLS	7524891.87	536986.55	1970	TR-08*	DMH	7523863.27	531819.255	3960
PL-S6 (39 m)	ADLS	7522877.89	535920.62	3670	TR-09*	DMH	7524637.25	517554.556	15000
CC-2*	DMH	7521503.79	507967.028	16500	TR-10*	DMH	7521480.32	511469.684	8400
CC-5*	DMH	7520518.45	509916.856	15600	TR-11*	DMH	7520622.34	507051.777	16200
CC-7*	DMH	7519335.59	510385.186	2820	TR-12*	DMH	7523494.28	530681.279	1260
CC-11*	DMH	7518037.46	511866.845	8520	TR-13*	DMH	7520351.34	527121.353	5460
CC-12*	DMH	7515772.38	503069.681	2820	TT-1E*	DMH	7529656.15	523381.434	1500
CC-14*	DMH	7513441.19	500339.139	5160	TT-2D*	DMH	7529108.16	524137.418	1140
CC-17*	DMH	7529948.41	506872.421	3060	TT-2E*	DMH	7528350.17	523484.431	1380
OT-03*	DMH	7522123.31	523448.431	9000	TT-4D*	DMH	7528638.17	524136.418	1080
OT-06*	DMH	7530372.13	526313.372	1260	TT-4E*	DMH	7529937.14	523912.423	1320
OT-08*	DMH	7522140.31	525789.381	9600					

Tabla 9: Información concentración de STD pozos habilitados en el acuífero superior e inferior.

Pozos con información de STD, habilitados en acuífero superior					Coordenadas: UTM WGS84				
Nombre	Empresa	Norte	Este	SDT [mg/L]	Nombre	Empresa	Norte	Este	SDT [mg/L]
CC-1	DMH	7521522.05	507977.597	43328	LE-2	MC	7516811.3	503126.88	2690
CC-10	DMH	7518042.12	511913.804	2584	OBS-7C	MC	7513699.5	500481.32	4100
CC-12	DMH	7515772.38	503069.681	3215	OBS-9C	MC	7514891.73	503886.95	2340
CC-14	DMH	7513441.19	500339.139	7356	OBS-11C	MC	7513232.77	498646.3	6510
CC-16	DMH	7522084.1	509379.778	23592	P-10	MC	7514207.64	503462.12	5410
CC-3	DMH	7519856.47	506890.44	4528	PBC-1	MC	7514709.42	502878.53	3390
CC-4	DMH	7520550	509911.946	10948	PBC-2	MC	7514545.57	502325.96	3650
CC-6	DMH	7519366.27	510417.266	2816	PPR-5	MC	7515475.9	502595.34	3510
CC-8	DMH	7520433.8	508259.591	9240	PPR-2	MC	7515710.85	505366	2650
CHU-45	DMH	7525458.06	509687.552	37776	W2 (Nazca, 200m)	ADLS	7519313	537591	6410
CHUCA-5	DMH	7520837.12	510103.102	17472	P2 (Nazca, 120m)	ADLS	7517565	534519.296	6490
CHUCA-6B	DMH	7521006.03	507770.052	26308	PL-D7 (216 m)	ADLS	7513919.14	516717.8	12100
CHUCA-7B	DMH	7521006.03	507770.054	3348	PL-D5 (170 m)	ADLS	7509729.78	521839.15	12276
PBMM-4	DMH	7523053.77	509033.225	20764	W2B (350 m)	ADLS	7518756.01	537388.96	12844
SE-4A	DMH	7519956.72	523513.581	10264	OBS-3 (372 m)	ADLS	7519809.35	538456.113	12844
SR-3	DMH	7530957.45	507876.443	15367	PLD-6B (198 m)	ADLS	7522865.06	535983.32	24600
SE-4	DMH	7531938.58	507797.922	10714	OBS-E3 (285-300)	ADLS	7517940.39	544865.977	13100
SE-3	DMH	7526866.25	531003.883	2494	OBS-4 (426 m)	ADLS	7519297.68	542141.26	15300
SE-5B	DMH	7518319.07	514181.756	4663	OBS-W2 (500 m)	ADLS	7519313	537591	12100
ARMH-1	DMH	7522129.96	513778.155	2680	OBS-W1 (500 m)	ADLS	7515021.45	532433.24	18700
ARMH-2	DMH	7522129.96	514656.846	8644	OBS-E1 (378 m)	ADLS	7525175.25	543451.71	21800
CHUCA-10B	DMH	7525288.01	508888.908	28819	OBS-2 (349 m)	ADLS	7514442.97	533858.38	26600
TL-12C	DMH	7525288.01	508888.908	9884	PL-D1 (310 m)	ADLS	7514948.28	530044.3	19500
PBMM-5	DMH	7519265.69	513746.255	2733	OBS-1 (323 m)	ADLS	7513003.09	530678.06	77800
PBMM-6	DMH	7519941.74	509141.433	22404	OBS-E2 (448 m)	ADLS	7512272.51	530078.29	85500
PBMM-7	DMH	7521761.1	511466.034	2503	OBS-E3 (500m)	ADLS	7517563.49	534715	108000
PBMM-1	DMH	7526734.19	509513.716	18256	P1	ADLS	7520499.34	539455.09	4000
PBMM-3	DMH	7523375.82	510454.331	46108	P1	ADLS	7520499.34	539455.09	4020

Tabla 10: Información concentración de STD pozos habilitados en el acuífero superior e inferior.

Pozos con información de STD, habilitados en acuífero superior					Coordenadas: UTM WGS84				
Nombre	Empresa	Norte	Este	SDT [mg/L]	Nombre	Empresa	Norte	Este	SDT [mg/L]
PBMM-8	DMH	7524355.54	508905.508	25202	P1	ADLS	7520499.34	539455.09	4280
TL-24	DMH	7517782.7	523559.797	9456	P2	ADLS	7517563.49	534715	7820
SI-12E	DMH	7526367.02	516090.701	4718	P2	ADLS	7517563.49	534715	7340
SI-11E	DMH	7527240.24	515231.597	5522	P2	ADLS	7517563.49	534715	7790
SI-24E	DMH	7519911.51	507050.187	9456	E3	ADLS	7517940.39	544856.98	11500
SI-7B	DMH	7522874.19	513380.558	2484	E3	ADLS	7517940.39	544856.98	13800
SI-2B	DMH	7526438.36	513201.948	26536	E3	ADLS	7517940.39	544856.98	14360
SI-1B	DMH	7526234.81	513700.927	20612	E3	ADLS	7517940.39	544856.98	13900
SI-6B	DMH	7525189.11	513380.559	14716	Px	ADLS	7522707	542029.04	2900
FCAB	MC	7516418.07	508135.69	3730	Px	ADLS	7522707	542029.04	3430

Tabla 11: Resumen de análisis químico para la caracterización química de la cuenca.

Resumen Análisis químico para la caracterización química de aguas superficiales, acuífero superior e inferior. *NA= No aplica (no registra información)														
Nombre	Empresa	Ubicación	Cl	SO4	As	NO3	HC03	Mo	Cu	Ca	K	Mg	Na	Sr
			[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
Rio Salado antes Loa	ADLS	Superficial	2200	120	1,42	287	287	0,0078	0,0043	172	112	90,3	1200	6,16
Rio Loa antes Salado	ADLS	Superficial	786	211	0,287	386	386	0,0086	0,004	139	35,9	111	476	2,26
Rio Loa después Salado	ADLS	Superficial	1530	163	0,9	357	357	0,008	0,004	164	76,8	102	871	4,33
Rio Loa @ Angostura	ADLS	Superficial	1790	199	1,1	391	391	0,0072	NA	240	71,1	112	970	5,02
PL-S3 (35 m)*	ADLS	Acuífero Superior	2.500	335	2,02	323	323	0,0072	0,0036	169	50,5	49,8	653	3,33
PL-S4 (44 m)*	ADLS	Acuífero Superior	1.480	394	1,27	230	230	0,005	0,0023	101	36	43,5	399	2,3
PL-S6 (39 m)	ADLS	Acuífero Superior	1.550	204	2,52	380	380	0,0072	0,0036	220	48,5	59	821	4,35
W2(Nazca 200m)	ADLS	Acuífero Superior	2940	156	0,508	450	450	0,0043	0,002	386	70,9	132	1300	10,8
P2 (Nazca, 120m)	ADLS	Acuífero Superior	3.290	11	0,0038	124	124	0,002	0,0044	352	80,9	158	1360	5,72
PL-S2 (38 m)	ADLS	Acuífero Superior	3.270	212	0,767	380	380	0,0037	0,0188	502	75,4	152	1320	13,1
PL-S1A (100 m)	ADLS	Acuífero Superior	4.490	2.430	0,256	330	330	0,0428	0,0462	939	87,7	193	2440	17
PL-S1B (39 m)	ADLS	Acuífero Superior	3.714	NA	0,198	0	0	0,001	0,005	582	88,1	219	1554	NA
PL-D2 (256 m)	ADLS	Acuífero Superior	5.390	2.320	0,24	722	565	0,0985	0,103	968	106	181	3310	22,3
PL-D7 (216 m)*	ADLS	Acuífero Superior	4.560	506	1,91	725	725	0,0402	0,0227	824	199	280	2740	14,1
PL-D5 (170 m)	ADLS	Acuífero Superior	6.098	NA	2,73	750	750	0,036	0,005	509	60,3	365	2592	NA
W2B (350 m)	ADLS	Acuífero Superior	6.850	NA	2,84	669	669	0,0648	0,0054	1310	65,8	207	3710	27,4
OBS-3 (372 m)*	ADLS	Acuífero Superior	4.410	NA	1,77	598	598	0,0906	0,0101	704	81	249	2610	13,8
PLD-6B (198 m)	ADLS	Acuífero Superior	12.400	1.320	0,53	781	781	0,0164	0,502	1050	155	327	6230	22,3
OBS-E3 (285-300 m)	ADLS	Acuífero Superior	6.290	482	1,53	1.703	1.703	0,002	0,0652	840	145	132	3180	20,6
OBS-4 (426 m)	ADLS	Acuífero Superior	7.810	543	0,00036	430	430	0,0298	0,0813	1100	200	199	3980	21,5
OBS-W2 (500 m)	ADLS	Acuífero Superior	5.470	2.080	0,598	1.563	1.563	0,0879	0,0628	855	138	129	3210	19,4
OBS-W1 (500 m)	ADLS	Acuífero Superior	8.760	2.280	0,237	1	NA	0,0268	0,0953	1220	154	359	4800	25,1
OBS-E1	ADLS	Acuífero Superior	10.600	2.540	0,408	2	573	0,0766	0,0899	1150	67,2	278	5970	22,5
OBS-2 (349 m)	ADLS	Acuífero Superior	14.700	1.890	0,831	1	89	0,284	0,158	1460	109	722	6120	24,4
PL-D1 (310 m)	ADLS	Acuífero Superior	24.700	3.150	NA	3	118	0,252	0,317	2160	371	634	13400	29,6
OBS-1 (323 m)	ADLS	Acuífero Superior	61.900	2.230	0,034	89	1	0,505	0,805	5110	185	1680	25600	106

Tabla 12: Resumen de análisis químico para la caracterización química de la cuenca.

Resumen Análisis químico para la caracterización química de aguas superficiales, acuífero superior e inferior.														*NA= No aplica (no registra información)
Nombre	Empresa	Ubicación	Cl	SO4	As	NO3	HC03	Mo	Cu	Ca	K	Mg	Na	Sr
			[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
OBS-E2 (448 m)	ADLS	Acuífero Inferior	89.500	960	0,222	15	119	0,087	0,515	15100	198	2570	31100	328
OBS-E3 (500m)	ADLS	Acuífero Inferior	83.800	859	NA	3	1.117	0,002	0,928	11500	760	1650	35600	290
Loa Yalquincha	MC	Superficial	1.770	198	1,06	0,2	1	0,01	0,00	225	90,2	109	869	NA
San Salvador	MC	Superficial	1.830	965	0,9	1	112	0,22	0,01	281	149	168	1140	NA
Loa la Cascada	MC	Superficial	2.580	438	1,9	1	0,3	0,02	0,00	266	139	161	1210	NA
P10	MC	Acuífero Inferior	2.260	1.050	0	3,02	1	0,05	0,01	250	70,3	140	1420	NA
PBC-1	MC	Acuífero Inferior	1.920	118	0,026	0,200	1,000	0,00	0,00	69,7	71,9	29,7	1170	NA
PBC-2	MC	Acuífero Inferior	1.720	594	0,004	0,200	1,000	0,00	0,00	12,3	97	16,4	1190	NA
OBS-11C	MC	Acuífero Inferior	3.590	426	0,028	2,000	1,000	0,09	0,02	203	467	1,2	1840	NA
OBS-7C	MC	Acuífero Inferior	2.000	624	0,034	0,200	7,000	0,01	0,00	126	78,6	30,6	1210	NA
PPR-2	MC	Acuífero Inferior	1.300	231	0,374	2,010	1,000	0,01	0,00	168	71	97,9	639	NA
PPR-5	MC	Acuífero Inferior	1.490	597	0,405	1,540	1,000	0,00	0,01	225	73,1	116	850	NA
F-CAB	MC	Acuífero Inferior	1.910	210	1,520	0,370	1,000	0,01	0,01	243	102	116	928	NA
LE-2	MC	Acuífero Inferior	1.280	198	1,710	1,060	1,000	0,03	0,02	172	85,7	95,8	692	NA
OBS-9C	MC	Acuífero Inferior	1.190	231	0,006	0,200	6,000	0,01	0,03	73,1	60,5	0,7	755	NA
PPR-3	MC	Acuífero Superior	1.660	284	1,860	7,130	1,000	0,01	0,00	237	102	108	897	NA
OBS-7L	MC	Acuífero Superior	2.380	327	1,290	0,910	1,000	0,00	0,00	262	139	128	691	NA
LE-9	MC	Acuífero Superior	2.120	247	1,580	1,960	1,000	0,00	0,00	256	110	131	1060	NA
LE-7	MC	Acuífero Superior	2.340	320	1,710	1,890	1,000	0,00	0,01	296	121	138	1050	NA
P-27	MC	Acuífero Superior	2.950	6	0,144	0,200	1,000	0,00	0,00	96,8	163	155	1320	NA
P-18	MC	Acuífero Superior	2.800	6	0,006	0,200	1,000	0,00	0,00	115	137	158	1220	NA
P-21	MC	Acuífero Superior	2.340	34	2,070	0,200	1,000	0,00	0,00	101	115	134	1020	NA
CC-1	DMH	Acuífero Inferior	9.286	12.466	0,460	0,000	399,000	1,37	7,42	571	203	1491	8510	NA
CHUCA-5	DMH	Acuífero Inferior	6.868	3.582	0,080	760,000	389,000	0,30	1,08	653,2	432	596	5360	17,5
SE-4A	DMH	Acuífero Inferior	4.590	1.871	0,130	23,000	238,000	0,47	0,10	789,2	104,8	428	2784	20,8
CC-4	DMH	Acuífero Inferior	3.705	1.653	0,320	0,000	149,000	0,12	0,10	420	214	356	2439	NA

Tabla 13: Resumen de análisis químico para la caracterización química de la cuenca.

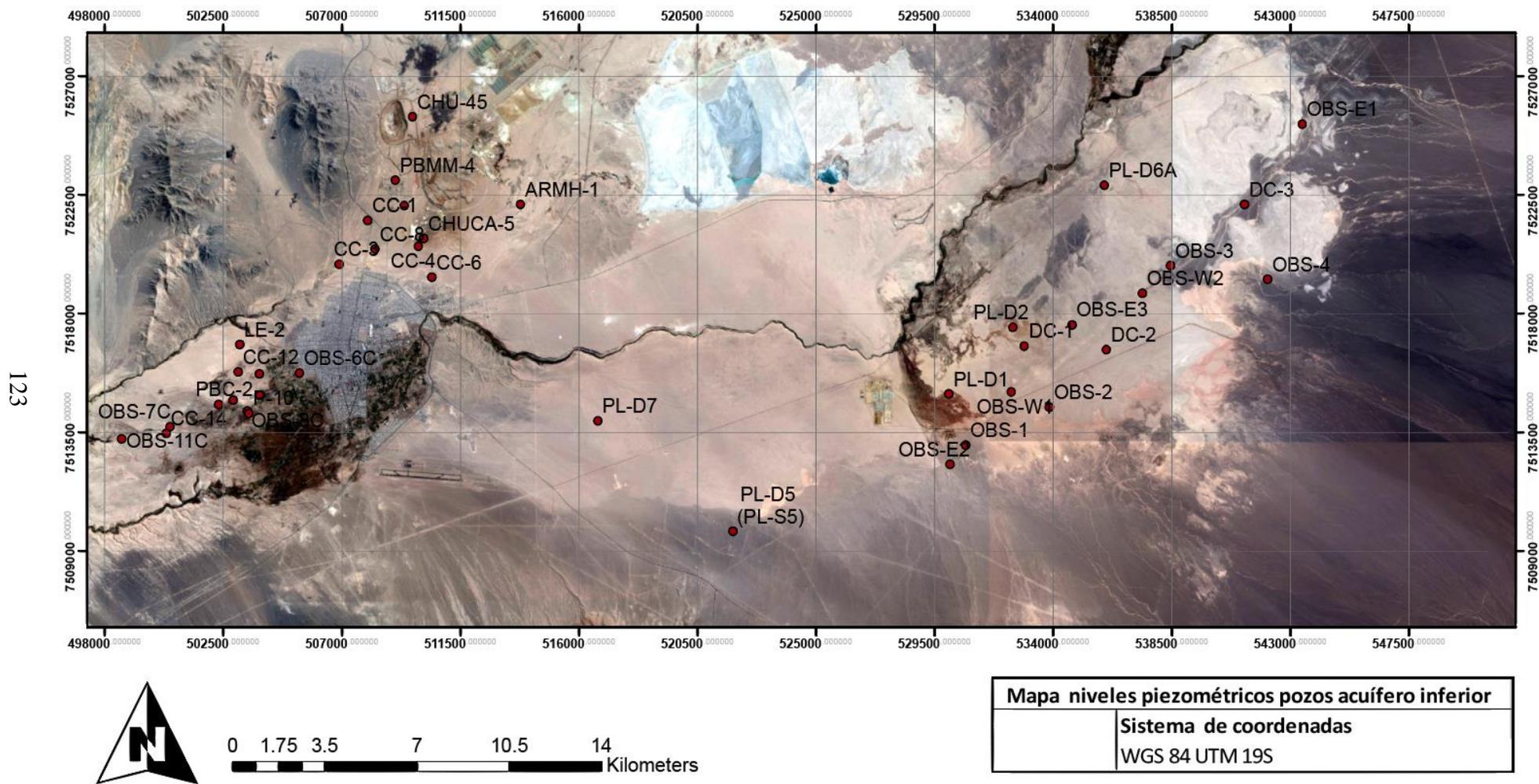
Resumen Análisis químico para la caracterización química de aguas superficiales, acuífero superior e inferior													*NA= No aplica (no registra información)		
Nombre	Empresa	Ubicación	Cl	SO4	As	NO3	HC03	Mo	Cu	Ca	K	Mg	Na	Sr	
			[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	
ARMH2	DMH	Acuífero Inferior	2.045	13.373	0,190	40,000	319,000	0,10	0,10	728	83	361,6	1100	15,5	
SI-6B	DMH	Acuífero Inferior	3.557	2.306	0,050	NA	NA	0,10	0,10	1.364	135	664	1512	29,4	
SI-24E	DMH	Acuífero Inferior	3.470	2.509	0,690	1230,000	146,000	0,13	0,11	393	297	322	2324	NA	
CC-8	DMH	Acuífero Inferior	2.706	1.600	0,200	0,000	114,000	0,10	0,12	675	112	382	1394	NA	
CHUCA-10B	DMH	Acuífero Inferior	2.559	11.400	0,030	NA	NA	NA	0,10	504	254,8	940	7108	9,4	
CHU-45	DMH	Acuífero Inferior	9.899	11.515	0,010	6900,000	531,000	0,49	0,10	500	335,8	1800	12192	17,1	
SI-1B	DMH	Acuífero Inferior	4.120	8.758	0,080	NA	NA	0,10	0,10	604	289	980	5212	19,5	
PBMM-1	DMH	Acuífero Inferior	3.654	4.622	0,098	NA	NA	0,17	0,09	682	141	428	3929	NA	
PBMM-3	DMH	Acuífero Inferior	14.913	7.583	0,092	NA	NA	0,33	0,12	1.034	402	937	10562	NA	
PBMM-8	DMH	Acuífero Inferior	3.983	10.085	0,033	NA	NA	1,83	0,06	503	213	750	5950	NA	
SI-2B	DMH	Acuífero Inferior	1.753	15.799	0,130	NA	NA	0,30	NA	464	243,2	656	5888	12,4	
PBMM-4	DMH	Acuífero Inferior	3.143	8.060	0,120	0,000	419,000	0,10	0,10	542	276	792	4299	NA	
CHUCA-6B	DMH	Acuífero Inferior	3.673	9.984	0,100	2600,000	431,000	0,89	0,10	420	259	804	5180	12,7	
CC-6	DMH	Acuífero Inferior	946	674	0,020	0,000	266,000	0,10	0,10	60	25,66	40,48	840	NA	
CC-3	DMH	Acuífero Inferior	1.984	863	0,280	0,000	147,000	0,10	0,10	194	103	144	1212	NA	
CC-12	DMH	Acuífero Inferior	1.369	217	0,780	0,200	287,000	0,10	0,59	228	53	1,8	640	NA	
CC-10	DMH	Acuífero Inferior	993	445	0,720	0,000	238,000	0,10	0,10	45,18	79	47,83	739	NA	
ARMH1	DMH	Acuífero Inferior	1.058	370	0,240	39,000	255,000	0,10	0,00	124	57,4	74,6	600	2,9	
SE-3	DMH	Acuífero Inferior	882	939	0,000	NA	NA	0,10	NA	320	23,4	2	444	8,3	
CHUCA-7B	DMH	Acuífero Inferior	1.940	7	0,100	0,000	73,000	0,89	0,10	49	56,38	96,18	1048	NA	
TL-24	DMH	Acuífero Inferior	2.240	429	0,880	0,000	323,000	0,05	0,05	260	45,6	138	1140	NA	
SI-7B	DMH	Acuífero Inferior	1.015	367	0,240	26,000	317,000	0,19	0,10	123	44,83	72,9	629,86	NA	
TL-07C	DMH	Acuífero Superior	2.546	551	0,460	0,000	560,000	0,05	0,05	244	56	128	1488	NA	
TL-09C	DMH	Acuífero Superior	2.138	364	1,490	0,000	648,000	0,10	0,10	271	26,59	93,9	1302	NA	
TL-10C	DMH	Acuífero Superior	455	183	0,420	4,820	392,000	0,05	0,10	97	42,4	63,2	298	NA	

Tabla 14: Resumen de análisis químico para la caracterización química de la cuenca.

Resumen Análisis químico para la caracterización química de aguas superficiales, acuífero superior e inferior													*NA= No aplica (no registra información)		
Nombre	Empresa	Ubicación	Cl [ppm]	SO4[ppm]	As	NO3	HC03	Mo	Cu	Ca	K	Mg	Na	Sr	
			[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	
TL-06C	DMH	Acuífero Superior	4.858	844	0,630	0,000	374,000	0,10	0,10	519	50,34	201,72	2229,95	NA	
SI-23C	DMH	Acuífero Superior	2.730	2.780	0,940	0,000	89,000	0,13	0,10	422	248	393	2123	NA	
TL-03C	DMH	Acuífero Superior	5.443	1.253	0,640	0,000	192,000	0,40	0,10	396	114	245,2	2700	NA	
TL-11C	DMH	Acuífero Superior	5.370	3.441	2,020	0,000	74,000	3,63	0,10	746	274,85	137,48	3589	NA	
TL-12C	DMH	Acuífero Superior	3.165	906	0,240	0,000	180,000	0,10	0,16	872	91,2	486	1136	NA	
SI-8C	DMH	Acuífero Superior	1.498	785	1,190	220,000	227,000	0,10	0,10	160	79,78	121	905,93	NA	
CC-7	DMH	Acuífero Superior	1.194	394	0,740	NA	NA	0,10	0,10	70	85,6	34,96	822	NA	
SI-18C	DMH	Acuífero Superior	5.306	2.792	0,820	0,000	116,000	1,12	0,10	397	286	274	3636	NA	
SE-4A	DMH	Acuífero Superior	4.483	1.674	1,360	0,000	229,000	0,47	0,10	653	80,4	335	2110	NA	
CC-9	DMH	Acuífero Superior	4.519	4.707	0,970	0,000	141,000	0,49	0,10	666	336	548	3547	NA	
TL-02C	DMH	Acuífero Superior	6.623	4.438	2,500	0,000	107,000	4,56	0,10	462	231,89	165,4	5579,55	NA	
TL-13C	DMH	Acuífero Superior	25.938	7.647	3,600	0,000	104,000	9,07	0,10	708	1222	834	19039	NA	
CC-2	DMH	Acuífero Superior	6.787	6.797	0,590	0,000	248,000	1,50	0,38	751	261	1045	5364	NA	
CC-5	DMH	Acuífero Superior	6.578	3.455	0,830	0,000	365,000	0,73	0,10	649	413	505	4630	NA	
CC-18	DMH	Acuífero Superior	5.987	14.167	0,690	0,000	324,000	1,54	0,10	591	320	1570	8513	NA	

## **Anexo B: Mapas y figuras**

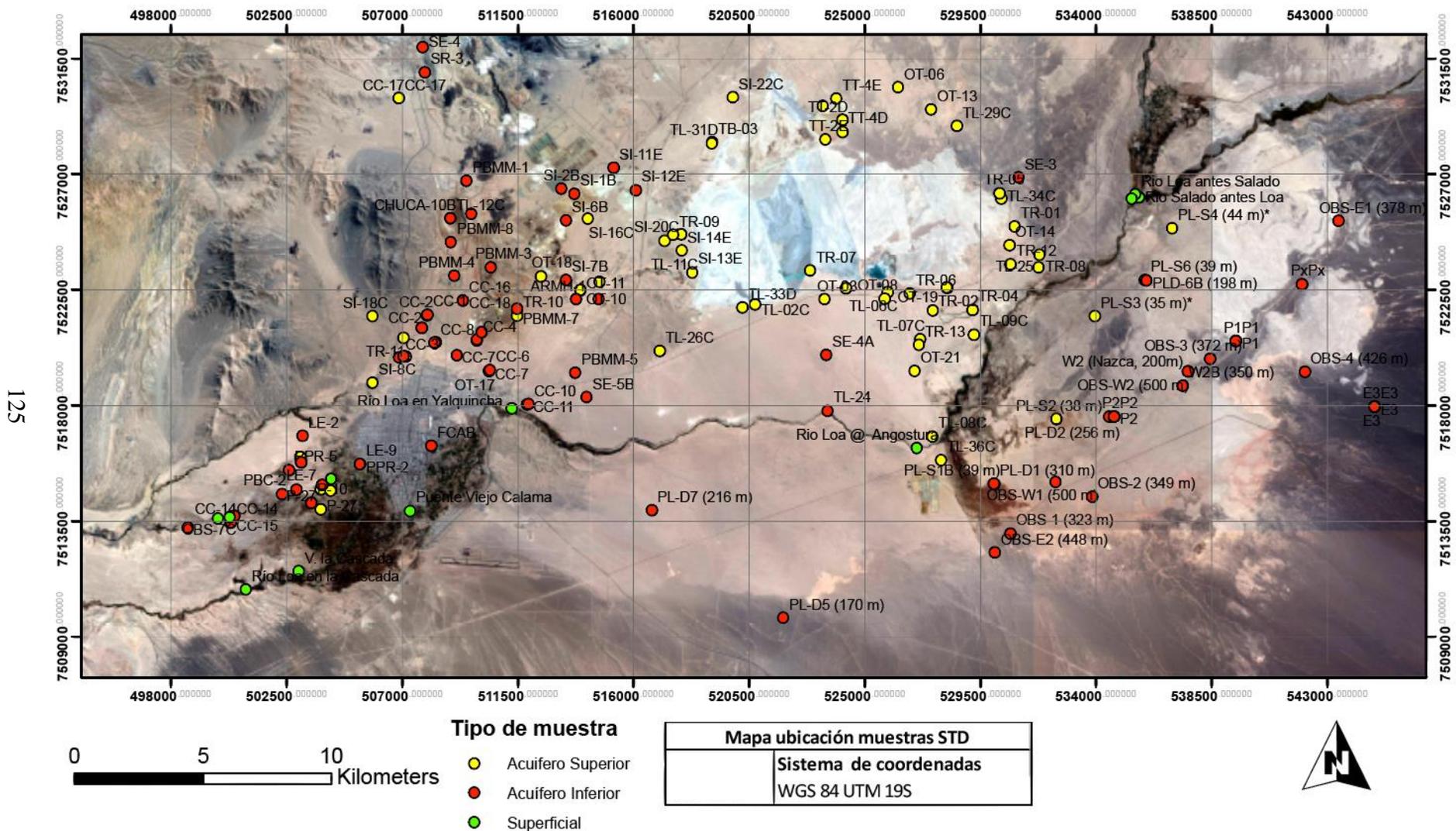
Mapa ubicación geográfica pozos con registro de niveles piezométricos acuífero inferior.



123

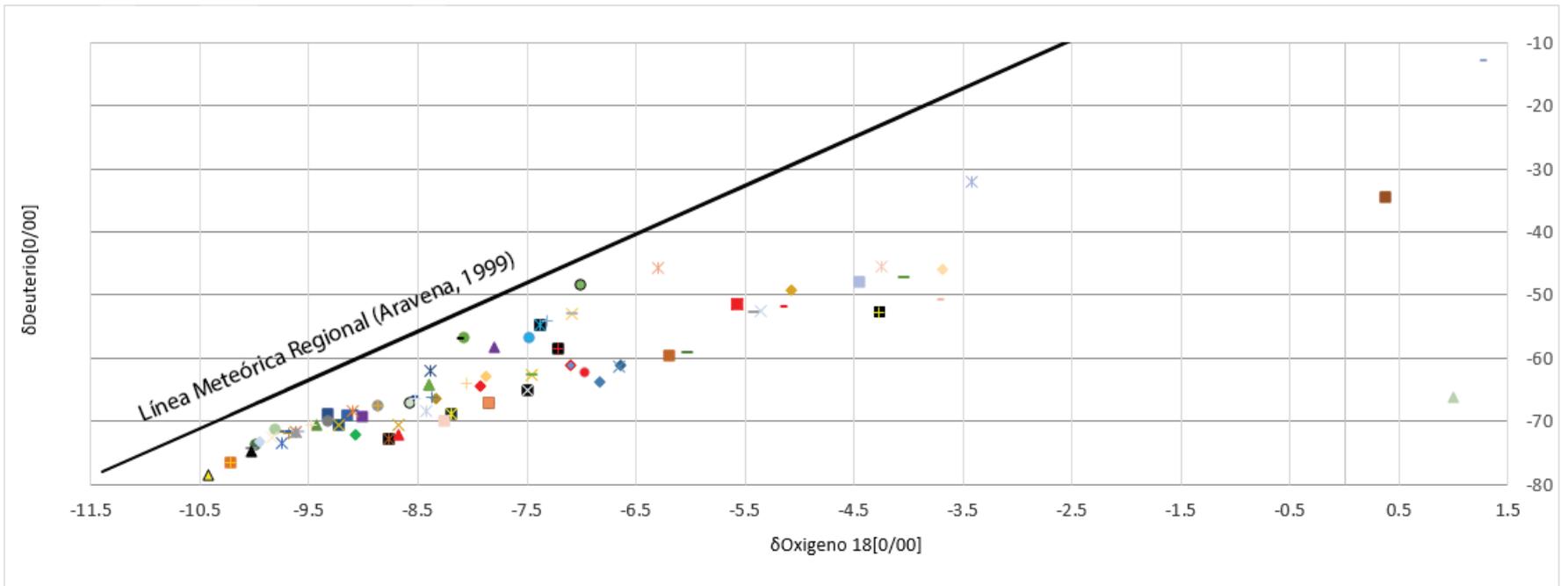


Mapa ubicación muestras que registran STD.



125

Gráfico  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$ , muestras red de pozos DMH.



126

- |            |             |            |          |          |                  |          |          |                 |                       |
|------------|-------------|------------|----------|----------|------------------|----------|----------|-----------------|-----------------------|
| — LMR      | ◆ SI-6B     | ■ PBMM-3   | ▲ SR-4   | ✕ SI-27E | ◆ TL-07C         | ■ TL-02C | ✕ RLL    | ■ RLN           | ● V-2-SUR             |
| ● SI-5D    | + SI-26E    | ■ SE-3     | - TL-17D | ◆ SI-25E | + RLM            | - V-9    | - RLL    | ◆ RLJ           | ▲ RLF                 |
| ■ TL-15    | ▲ TL-24     | ⊠ TL-26C   | ■ SE-5B  | ● SI-7B  | ■ Salado Chico   | ✕ RLK    | ● RSSA   | + AD-1170       | - Laguna Inca Coya    |
| + SI-13C   | - PBMM-7    | - SI-3B    | ◆ SI-2B  | ■ SI-1B  | - M-32           | ◆ Laguna | ■ Laguna | ▲ SI-35E        | ✕ Vega Muro-Norte     |
| ▲ PBMM-1   | ✕ CHUCA-10E | ⊠ CHUCA-6B | ◆ PBMM-4 | + SI-24E | ✕ Curtis         | ● Conchi | ■ P-10   | - M-14          | - punto al norte M-13 |
| ▲ CHUCA-7B | - SI-11C    | ◆ ARMH-3   | ■ ARMH-1 | ▲ SI-10B | ◆ DTT            | ■ ZAC    | ▲ ZIT    | ✕ TT Muro Oeste | ✕ TT antes entrada    |
| ✕ SI-15E   | ✕ SI-20E    | ● SI-33E   | + SI-8C  | - SI-22C | ● Vega Portezuel | + TL-31D | - P-11   | ◆ CHU-26B       | ◆ SI-37E              |
| - SI-18C   | ◆ TT-4E     | ■ TL-10C   | ✕ TL-03C | ✕ TL-07C | ■ SI-5B          | ▲ TL-25  | ✕ TL-22  | ✕ SI-9E         | ● SI-8E               |
| ● TL-8C    | ■ TL-02C    | - SI-14E   | - SI-20C | ◆ SI-15C | + SI-19C         | ▲ SI-20E | ✕ TL-09C |                 |                       |
| ▲ SI-8C    | ⊠ TT-4E     | + TL-10C   | ■ TL-09C | - TL-03C |                  |          |          |                 |                       |