



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

**PROCESOS DE INTERACCIÓN AGUA-ROCA, VARIACIONES GEOQUÍMICAS DE
AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL PROYECTO SIERRA GORDA,
REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

PAULINA FERNANDA VERGARA CEA

PROFESOR GUÍA:

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DIRK RUTTGER

LINDA DANIELE

SANTIAGO DE CHILE

2014

RESUMEN

En esta investigación se presentan los resultados del estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de aguas subterráneas en el depósito tipo pórfido de Cu-Mo Sierra Gorda, Región de Antofagasta, Chile. El objetivo es identificar los procesos de interacción agua-roca que controlan la composición de las aguas subterráneas, para aproximarse así a un entendimiento del acuífero en cuanto a las variaciones químicas que presenta en el área de estudio. Se utiliza información recopilada por la consultora VAIGS en el contexto del programa de monitoreo de calidad química y niveles de aguas subterránea, financiado por Sierra Gorda Sociedad Contractual Minera (SGSCM).

Se cuenta con una base de datos, que comprende el monitoreo químico trimestral de 4 pozos de exploración (2008 a 2013) y 8 pozos tipo Casagrande (2011 y 2013). Se registran parámetros fisicoquímicos in situ así como de concentraciones de 60 elementos en el agua muestreada, información a la cual se le realiza un control de calidad (duplicados, blancos y balance iónico). Asimismo se cuenta con información geológica e hidrogeológica de los puntos de monitoreo.

Se analizan los datos en cuanto a su evolución temporal, en cada punto de monitoreo, así como su distribución espacial utilizando diagramas Stiff, Durov y concentraciones relativas al ion cloruro, de elementos mayores, menores y trazas. También se realiza un tratamiento estadístico de los datos, como análisis de componentes principales y dendogramas, los que identifican tres componentes que explican la variabilidad de los elementos mayores, siendo la disolución de sales la principal causa. Cruzando los resultados hidroquímicos obtenidos con la información estructural y piezométrica existente, surge la hipótesis de un control estructural en el área de estudio (desconexión acuífero), lo cual explicaría las distintas signaturas químicas observadas entre Pampa Lina y Sierra Gorda. Las bajas permeabilidades permiten definir al acuífero como un acuitardo, sustentando la hipótesis de equilibrio termodinámico en cuanto a las reacciones químicas que tienen lugar entre el agua y la roca. Se plantean simulaciones inversas respecto de la evolución química del flujo de agua en el perfil A-A', considerando tres escenarios cuyos resultados apoyan la hipótesis de una desconexión en el acuífero. Respecto de la evolución química en el perfil A-A', se concluye que el yacimiento incide en la química del agua, controlando variaciones de Ca, SO₄, Cu, etc., las que se explican por variaciones en la saturación del agua respecto del yeso, alunita, brocantita, antlerita, entre otros. Destaca la mala calidad del agua, respecto de la norma chilena de aguas para riego, en el contexto aquí analizado (etapa pre-operacional del proyecto minero), respondiendo las altas concentraciones químicas a factores naturales de interacción agua-roca.

DEDICATORIA

A Teresa, Jorge, Francisca, Alcorfo, Ana, Polcha y Canuto.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, a todos los que me acompañaron en este proceso kafkiano: gracias totales.

En particular a los socios de VAIGS por permitirme jugar con sus datos y al equipo humano del 702, por todos los pasteles y helados compartidos. En especial a Dirk, por su buena voluntad, guía, consejo y navegado. A Brian por gestionar el tema de mi tesis y darme los tiempos necesarios para terminarla. A Linda, por iluminarme en el camino y guiarme en el proceso ¡muchísimas gracias!

Gracias a mis papás y hermanos, por las inmejorables circunstancias y oportunidades que me regalaron en la vida. A mi prima Ana, por incluirme en su hermosa familia.

A mis amigos, por enriquecer mi mundo y aplazar la entrega de la tesis. En particular a mis gemelas, por ser las mejores del universo. A las cabras, por ser unas loquillas, y a las Chaquetas, porque sí.

También debo agradecer a los mil y un talleres que encontré en mi andar, al básquetbol, artesanías y pinches: por llenar de colores mis días, y de vida a la vida.

Muchas gracias.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido.....	iv
Índice de tablas.....	vii
Índice de figuras.....	viii
1. Introducción.....	2
1.1 Objetivos.....	5
1.1.1 Objetivo general.....	5
1.1.2 Objetivos específicos.....	5
1.2 Hipótesis de trabajo.....	5
1.3 Metodología.....	6
1.3.1 Recopilación de antecedentes.....	6
1.3.2 Análisis de muestras de aguas subterráneas.....	7
1.3.3 Procesamiento de datos.....	7
1.3.4 Desarrollo de modelos.....	8
2. Antecedentes generales.....	9
2.1 Ubicación y accesos.....	9
2.2 Antecedentes de trabajos previos.....	9
2.3 Clima.....	10
2.3.1 Clima desértico nuboso.....	10
2.3.2 Clima desértico normal.....	11
2.3.3 Clima desértico marginal de altura.....	11
2.3.4 Clima de estepa de altura.....	11
2.4 Geomorfología.....	12
2.5 Hidrografía.....	13
2.6 Hidrogeología Regional.....	14
2.7 Hidrogeología del sector Sierra Gorda.....	15

3 Marco Geológico	17
3.1 Geología Regional.....	17
3.2 Geología Local	19
3.2.1 Litología.....	19
3.2.2 Estructuras	22
3.2.3 Alteración.....	24
3.2.4 Mineralización	27
4. Marco Hidrogeológico.....	31
4.1 Hidrogeología General	31
4.2 Hidrogeología Local.....	32
4.2.1 Unidades de permeabilidad.....	33
4.3 Características Hidrológicas.....	36
4.3.1 Recarga	39
4.3.2 Almacenamiento	40
4.3.3 Descarga.....	40
4.3.4 Hidroquímica	42
5. Metodología de muestreo y procedimientos analíticos	44
5.1 Muestreo de aguas subterráneas	44
Metodología de muestreo.....	44
5.2 Procedimientos analíticos de laboratorio	45
6. Características de puntos de muestreo.....	47
6.1 Selección y ubicación de puntos de muestreo.....	47
6.2 Características geológicas de los puntos de muestreo.....	49
7. Control de calidad.....	54
7.1 Geoquímica de 60 elementos	55
7.1.1 Control de calidad analítico	55

7.1.2 Control de calidad de terreno.....	55
7.2 Geoquímica de elementos mayores.....	58
8. Hidrogeoquímica de aguas subterráneas en Sierra Gorda.....	60
8.1 Evolución temporal en los datos geoquímicos de los pozos de monitoreo.....	60
8.2 Parámetros físico-químicos.....	61
8.3 Geoquímica de elementos mayores.....	64
8.3.2 Concentraciones relativas de elementos.....	67
8.4 Geoquímica de elementos menores y traza.....	70
8.4.1 Concentraciones relativas de elementos menores y traza.....	70
8.5 Comparación de muestras de aguas filtradas versus no filtradas.....	73
9. Análisis estadístico.....	75
9.1 Estadística univariable.....	75
9.2 Dendrograma, análisis de conglomerados.....	78
9.3 Análisis de componentes principales.....	79
10 Equilibrio termodinámico.....	83
10.1 Índices de saturación mineral.....	84
10.2 Modelo inverso.....	92
11. Discusiones.....	98
12. Conclusiones.....	114
Bibliografía.....	117
Anexos.....	119
Anexo 1. Características de puntos de muestreo.....	120
Anexo 2. Análisis de laboratorio.....	121
Anexo 3. Control de calidad.....	123
Anexo 4. Evolución temporal de pozos.....	129
Anexo 5. Estadísticas.....	137

Índice de tablas

Tabla 1. Tasas de recarga estimadas.....	39
Tabla 2. Derechos de agua constituidos. Fuente: DGA.....	41
Tabla 3. Resumen pozos de monitoreo.....	49
Tabla 4. Características geológicas de puntos de monitoreo.....	50
Tabla 5. Diferencias relativas absolutas para muestras filtradas originales y sus duplicados (febrero 2011 a noviembre 2013). En rojo se destacan $DRA > 30\%$	57
Tabla 6. Error de balance iónico (%) de muestras de agua subterránea en Sierra Gorda.....	59
Tabla 7. Estadística básica de base de datos histórica, proyecto Sierra Gorda (2008 - 2013).	76
Tabla 8. Análisis de Componentes Principales Noviembre 2012.	80
Tabla 9. Pesos de los componentes.	81
Tabla 10. Minerales presentes en perfil A-A'.....	93

Índice de figuras

Figura 1. Zona de estudio. Modificado de atlas geográfico de Chile para la educación (IGM), 4 edición, 1994.	9
Figura 2. Tipos de clima en la región de Antofagasta. Modificada de guía climatológica práctica, dirección meteorológica de Chile.	12
Figura 3. Área del proyecto minero Sierra Gorda.	13
Figura 4. Mapa hidrológico regional. Modificado de división de subcuencas por regiones, DGA, 2000.	14
Figura 5. Hidrogeología regional. Modificado de Mapa Hidrogeológico de Chile, escala 1:2500000, 1986, Dirección General de Aguas.	16
Figura 6. Mapa geológico proyecto Sierra Gorda. Autor Jorge Maya, Escala 1:50.000, actualizado año 2010. Modificado.	18
Figura 7. Mapa en planta cota 1572 m.s.n.m., litología proyecto Sierra Gorda. Modificado de modelo del yacimiento, 2014 (información proporcionada por SGSCM).	20
Figura 8. Estructuras en área de estudio.	23
Figura 9. Mapa en planta cota 1572 m.s.n.m., alteración proyecto Sierra Gorda. Modificado de modelo del yacimiento, 2014 (información proporcionada por SGSCM).	25
Figura 10. Mapa en planta cota 1572 m.s.n.m., mineralización proyecto Sierra Gorda. Modificado de modelo del yacimiento, 2014 (información proporcionada por SGSCM).	28
Figura 11. Cuenca Sierra Gorda. Modificado de actualización hidrogeológica proyecto Sierra Gorda, VAIGS, 2014.	33
Figura 12. Ubicación de sondajes geotécnicos utilizados para redefinir permeabilidades.	34
Figura 13. Permeabilidad en zona de estudio. Colores indican el sector al cual corresponden los valores de permeabilidad (ver explicación en el texto).	37
Figura 14. Curvas de nivel agua subterránea. Modificado de actualización hidrogeológica, VAIGS, 2014.	38
Figura 15. Pozos con derechos de aguas concedidas. Fuente: DGA.	42
Figura 16. Mapa de pozos de monitoreo y perfil A-A'.	47
Figura 17. Sección A-A', perfil de Litología. Modificado de perfil inédito de SGSCM, 2013.	51
Figura 18. Sección A-A', perfil de alteración. Modificado de perfil inédito de SGSCM, 2013. ...	52

Figura 19. Sección A-A', perfil de mineralización. Modificado de perfil inédito de SGSCM, 2013.	52
Figura 20. pH de pozos de monitoreo históricos (izq.) y pozos CB (der.). Líneas punteadas indican límites establecidos por la norma de aguas para riego, NCh1333.....	61
Figura 21. Registro de temperatura, pozos históricos (izq.) y pozos CB (der.).....	62
Figura 22. Registro de ORP, pozos históricos (izq.) y pozos CB (der.).....	62
Figura 23. Diagrama Durov, monitoreo agosto 2013 y noviembre 2012 (pozos KP y SG-352). .	63
Figura 24. Registro de sólidos totales disueltos (TDS), resultados de laboratorio. Monitoreo de pozos históricos (izq.) y pozos CB (der.).....	64
Figura 25. Diagrama Piper, monitoreo agosto 2013.....	65
Figura 26. Diagrama de distribución Stiff, monitoreo mayo 2013. Datos de KP-DH10-33 y KP-DH10-40 son de noviembre 2012. Flechas rojas indican dirección de flujo de agua.	66
Figura 27. Concentraciones de iones mayores versus ion cloruro, campaña agosto 2013 y noviembre 2012.....	67
Figura 28. Evolución de la concentración de SO ₄ y Ca, a lo largo de la línea de flujo. En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvadora y Catabela.	68
Figura 29. Evolución de concentración de Cl y Na, a lo largo de la línea de flujo. En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvadora y Catabela.	69
Figura 30. Evolución de concentración de K y Mg, a lo largo de la línea de flujo. En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvadora y Catabela.	69
Figura 31. Concentraciones agrupadas de elementos mayores, menores y trazas versus ion cloruro. Campañas de agosto 2013 y noviembre de 2012 (SG-352 y pozos KP).	71
Figura 32. Evolución de elementos mayores, menores y traza a lo largo de la línea de flujo. Campaña agosto 2013 y noviembre 2012 (pozos KP y SG-352). En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvadora y Catabela.	72
Figura 33. Fracción de muestras filtradas divididas en muestras sin filtrar. Las barras de error corresponden a una vez desviación estándar (1σ).....	73
Figura 34. Promedio trimestral de 6 años, muestras filtradas, campañas 2008 a 2013. Barras de error corresponden a una desviación estándar.....	77
Figura 35. Dendogramas, campaña noviembre 2012 y mayo 2013, según observaciones (pozos) y variables.....	79
Figura 36. Grafica de pesos ACP noviembre 2012	81

Figura 37. Índice de saturación, pozo CB-3 (izq.) y CB-4 (der.)	87
Figura 38. Índice de saturación, pozo SG-352 (izq.) y SG-493 (der.).....	88
Figura 39. Índice de saturación, pozo KP-DH10-33 (izq.) y KP-DH10-40 (der.)	89
Figura 40. Nivel freático, pozo CB-7 (izq.) y pozo CB-6 (der.)	98
Figura 41. Superficie zona de estudio*, con proyección de nivel freático -NF- (exagerado).....	99
Figura 42. Evolución de concentraciones a lo largo del perfil, en el sentido del flujo: B, Li, K, Na y Cl.	102
Figura 43. Sulfato versus calcio, campaña agosto 2013.....	104
Figura 44. Evolución de concentraciones a lo largo del perfil, en el sentido del flujo: SO ₄ y Mg.	104
Figura 45. Concentración de Sr versus Ca y Cl, monitoreo agosto 2013 y noviembre 2012.....	106
Figura 46. Evolución de concentraciones a lo largo del perfil, en el sentido del flujo: Ca y Sr.	107

1. Introducción

Hoy en día, una de las líneas de investigación prioritaria en hidrogeología consiste en estudios de simulación de flujo y transporte de agentes en solución, cuya finalidad es predecir la evolución geoquímica tanto del agua subterránea que interfiere con focos contaminantes en diversos medios geológicos, como la evolución química del medio hospedante producto de esta interacción.

La signatura química de las aguas subterráneas es principalmente resultado de la interacción entre el agua subterránea y la composición mineral del acuífero a través del cual se mueve. Procesos hidrogeoquímicos, como la disolución, precipitación, intercambio iónico y sorción, junto con el tiempo de residencia que tiene el flujo de agua, controlan la composición química de las aguas subterráneas (Apodaca et al., 2002; Cervetto, 2012).

Depósitos minerales sin explotar proveen de laboratorios naturales para entender procesos de contaminación, siendo ellos la fuente puesto que interacciones entre el agua subterránea y el depósito resulta en abundancia de metales por sobre la norma permitida, atentando muchas veces con la salud (Leybourne et al., 2006, 2008). Dependiendo del camino seguido por una corriente de flujo y de los procesos que ocurran durante su recorrido, se podrá producir la dispersión de los contaminantes, pudiendo regresar a la superficie del terreno y resultar peligrosos para el hombre y la biosfera (García et al., 2004).

Los procesos que tuvieron lugar para generar la química de las aguas resultantes pueden ser entendidos aproximándonos con una simulación geoquímica inversa (Sharif et al., 2008), método que es utilizado para reconstruir la evolución geoquímica de las aguas subterráneas desde un punto del acuífero hasta otro ubicado aguas arriba. Dichos modelos constituyen herramientas básicas para reproducir la respuesta de un sistema natural a diferentes estímulos externos a dicho sistema. La predicción del comportamiento del agua subterránea puede permitir resolver importantes problemas referentes a la calidad de las aguas procedentes de diferentes escenarios como son faenas mineras, plantas industriales, vertederos, zonas de almacenamiento de residuos, entre otros (Ward et al., 2000).

En los últimos años la explotación de recursos minerales y su relación con el medio ambiente es un tema que interesa no solo al Estado sino que también a las comunidades. Es por este motivo que establecer una línea base del área de influencia de un proyecto previo a su ejecución, es nece-

sario y solicitado como herramienta legal, permitiendo evaluar el impacto que tales actividades pudiesen generar en el medio ambiente, con el objetivo de mejorar las prácticas y proteger los sistemas naturales.

En tal contexto, este año se realiza una actualización del modelo hidrogeológico del proyecto Sierra Gorda (Mina-Planta Catabela) de la compañía Sierra Gorda Sociedad Contractual Minera (SGSCM), ubicado en la II Región de Antofagasta. Esta caracterización hidrogeológica se resume a través de un modelo conceptual, el cual es presentado como soporte al Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) exigido por las normativas ambientales vigentes en el país, realizándose en el año 2010 el primer análisis hidrogeológico del sistema de agua subterránea de Sierra Gorda, el cual fue entregado al organismo evaluador.

En el área del sector Mina Catabela las principales unidades geológicas son sedimentos aluviales y rocas volcánicas. El depósito Sierra Gorda se define como un stock modesto de cobre y molibdeno controlado por brechas. Las aguas superficiales tal como la presencia de vegetación, es escasa, muchas veces ausente, en el área de la cuenca. Flujos de agua subterránea se producen en respuesta a filtraciones derivadas de las precipitaciones, las que ocurren principalmente en el período de invierno altiplánico hacia el Este del área del proyecto. Los niveles de agua subterránea se encuentran entre 1620 y 1537 metros sobre el nivel de mar (SWS, 2010).

El proyecto Sierra Gorda es un proyecto minero que abarca varias comunas debido a la distribución de sus operaciones, siendo de interés para esta memoria el sector mina-planta Catabela ubicado en la comuna de Sierra Gorda, donde se encuentran los rajos de mina Catabela y Salvadora 1. El yacimiento contiene sulfuros y óxidos cuya principal mena es el cobre, encontrándose en menor proporción molibdeno y oro. La apertura de la mina rajo abierto llamada Catabela, se construye sobre minas anteriores conocidas como Catalina e Isabel. La ampliación de esta área, implica generar un rajo de 2 kilómetros de radio con una profundidad de 900 metros. Se estima un potencial, de explotación y producción del proyecto de 21 a 25 años. En la zona de estudio, es decir, el sector de la planta en Sierra Gorda se ubicarán depósitos de estériles, relaves y pilas de lixiviación para los minerales oxidados así como la planta de procesamiento que incluye molienda y flotación.

Uno de los impactos identificados por la empresa Golder Associates (2010), responsable de realizar el estudio de impacto ambiental para el proyecto, es el descenso de las napas y posibles efectos en la calidad de aguas subterráneas.

En el área de estudio se cuentan con 12 pozos de monitoreo hidrogeológico, de los cuales se emiten informes trimestrales respecto de los niveles piezométricos del acuífero, así como informes de calidad de aguas. También existen otros pozos de uso interno, cuya información no está comprometida con el SEIA. Varios de ellos cuentan con datos de calidad de las aguas, los que permitirían a través de la modelación geoquímica, una primera aproximación en el entendimiento de la interacción agua-roca que tiene lugar en profundidad. La base de datos del monitoreo de pozos, incluye información que permite hacer comparaciones estacionales.

Actualmente el proyecto se encuentra en la etapa de construcción, tras recibir la aprobación de su Evaluación Impacto Ambiental (EIA) a mediados de 2011, adquiriendo con las autoridades el compromiso de realizar un monitoreo mensual y trimestral de niveles de agua subterránea y calidad de aguas, respectivamente.

Es en este contexto, donde surge la necesidad de analizar la geoquímica del agua para mejorar la comprensión del sistema de agua subterránea. El tema a desarrollar en este trabajo de título forma parte del estudio y monitoreo hidrogeológico del Proyecto Sierra Gorda.

Actualmente se cuenta con una base de datos geoquímicos de 33 pozos ubicados tanto al interior del proyecto como en las inmediaciones, alcanzando en algunos pozos cerca de 5 años de monitoreo, los cuales solo han sido analizados de manera descriptiva en cuanto a variaciones estacionales. En esta actividad minera, minerales sulfurados que se formaron en un ambiente reductor quedan expuestos a un ambiente oxidante, resultando en su desestabilización y potencial liberación de metales (Dold, 2003). Entendiendo que una vez que la apertura del rajo alcance las zonas mineralizadas y en particular el nivel freático, podrían producir desequilibrios al modificar la zona de oxidación así como exponer a ciertas asociaciones minerales a nuevas condiciones redox. Por lo descrito, es importante entender la interacción agua-roca, lo que aporta a futuras discusiones respecto de impactos ambientales asociados a la actividad minera y contribuye a la caracterización de la línea base del proyecto (Soto, 2010), conociendo así el estado base de la geoquímica del agua y los mecanismos que la condicionan.

Además este estudio contribuye a dilucidar la procedencia de las aguas en la zona, puesto que actualmente existe controversia respecto de si los pozos de extracción de proyectos cercanos en el sector de Pampa Lina, ubicado próximo al proyecto en el sector Este, presentarían reducción de niveles por el funcionamiento del proyecto Sierra Gorda. Si bien análisis estructurales así como de permeabilidades muestran una desconexión entre ambos sectores, el análisis de la geoquímica de aguas contribuiría en esta discusión.

1.1 Objetivos

En este trabajo se busca presentar los resultados del estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de aguas subterráneas en el depósito tipo pórfido de Cu-Au-Mo proyecto Sierra Gorda, mina-planta Catabela, Región de Antofagasta, en el norte de Chile. El objetivo es determinar los procesos de interacción agua-roca que controlan la composición del agua subterránea. Este estudio forma parte del proyecto “Actualización de la caracterización hidrogeológica proyecto Sierra Gorda” encargado a la empresa consultora VAI Groundwater Solutions (VAIGS) y financiado por la empresa Minera Sierra Gorda SCM (SGSCM), con el propósito de servir de soporte a los estudios de impacto ambiental exigidos por la normativa vigente.

1.1.1 Objetivo general

Determinar las propiedades hidrogeológicas e hidrogeoquímicas del agua subterránea en el área de estudio, a través de la interpretación de la base de datos geoquímicos recopilado a lo largo de 5 años en el proyecto, la cual proporciona parámetros físicos-químicos y geoquímicos en las muestras de agua así como de la información obtenida en los 12 pozos de monitoreo en el área de estudio. Se busca determinar los procesos físico-químicos que controlan las características y composición del agua.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1.- Definir los parámetros hidrogeológicos.
- 2.- Actualizar el análisis de los niveles freáticos monitoreados en el área de Sierra Gorda.
- 3.- Reconocer posibles variaciones estacionales de los parámetros medidos.
- 4.- Determinar la influencia de los procesos de interacción agua-medio hospedante, en las condiciones físico-químicas y geoquímicas del agua subterránea en el sector.

1.2 Hipótesis de trabajo

La interacción de aguas subterráneas con el depósito mineral del proyecto Sierra Gorda, mina Catabela y Salvadora, modifica las propiedades del agua, pudiendo generar variaciones compo-

cionales respecto a aquella fuera del depósito. Lo anterior puede ser evaluado a través de la medición de parámetros físico-químicos y el análisis hidrogeoquímico de muestras de agua en la zona.

1.3 Metodología

La metodología de trabajo comprende las siguientes etapas: recopilación de antecedentes, revisión de campañas de muestreo en terreno, actualización de caracterización hidrogeológica, análisis geoquímico de muestras, procesamiento de datos e interpretación y desarrollo de modelos geoquímicos.

Las siguientes actividades se vinculan con los objetivos específicos enumerados en el punto anterior:

Objetivo 1, metodología:

-Actualizar las unidades hidrogeológicas del sistema de agua subterránea de acuerdo a los nuevos datos litológicos. Incorporar la nueva información de los pozos y niveles.

Objetivo 2, metodología:

- Actualizar los parámetros químicos para los pozos incluidos en el EIA y analizar su comportamiento en el tiempo. Validar la información a utilizar, a través de un control de calidad de los datos. Incluir análisis estadístico de la variabilidad de los datos, utilizando software Statgraphics.

Objetivo 3. metodología:

-Determinar la influencia de las características hidrogeológicas del sector en las propiedades del agua subterránea. Identificar fases minerales representativas del medio hospedante del acuífero. Simulación geoquímica de interacción agua-roca con software PHREEQC y THE GEOCHEMIST WORKBENCH.

1.3.1 Recopilación de antecedentes

Corresponde a la recopilación de los fundamentos teóricos de simulación geoquímica e interacción agua roca, hidrología, hidrogeología e hidrogeoquímica y modelación de sistemas de agua

subterránea, además de los antecedentes de la zona de estudio (geología, geomorfología, hidrología, clima, etc.). SGSCM puso a disposición todos los antecedentes geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos de la zona del proyecto Sierra Gorda. También se recopila información pública sobre calidad de aguas informadas por proyectos mineros emplazados aguas arriba de la zona de estudio (Spence, Cerro Dominador).

1.3.2 Análisis de muestras de aguas subterráneas

El muestreo de agua subterránea, se realiza en 6 pozos principales como parte del monitoreo de la línea base de calidad de agua en el proyecto, en forma trimestral entre julio del 2008 y agosto del 2010, por SWS. Posterior a dicha fecha, se instalaron 12 pozos de monitoreo hidrogeológico, de los cuales 4 se encuentran secos, siendo monitoreados de manera trimestral, hasta Junio del 2013.

Para cada muestra se mide in situ los parámetros físico-químicos: pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales. En cada punto se toman cuatro muestras, las cuales se analizan para química general (concentraciones totales y disueltos), TDS, TSS y iones. Para realizar un control de calidad de datos, se toman blancos y duplicados en terreno.

El análisis de muestras de aguas subterráneas se encuentra disponible para efectos de esta memoria gracias al apoyo de VAIGS y SGSCM, quienes proporcionan la base de datos con las que se desarrolla este trabajo.

13.3 Procesamiento de datos

Los datos serán procesados con el fin de caracterizar las aguas basado en diagramas de clasificación (Piper, Durov, Stiff) que consideran aniones y cationes mayores, así como otros parámetros fisicoquímicos. También se analizará la evolución temporal de los elementos químicos y parámetros fisicoquímicos de cada pozo, con énfasis en variaciones estacionales, además de estadística univariable (determinación de media, máximos, mínimos, desviación estándar, valores umbrales) así como análisis de componente principal y dendrogramas, sumado a simulaciones termodinámicas, asumiendo equilibrio.

1.3.4 Desarrollo de modelos

A través del software THE GEOCHEMIST'S WORKBENCH se desarrolla un modelo en equilibrio del sistema de aguas subterráneas, utilizando los parámetros analizados in situ y en laboratorio, para cada campaña de muestreo. El modelo incluye el cálculo de índices de saturación mineral y la especiación de elementos, lo que, junto con el modelo geológico existente del depósito de Sierra Gorda, mina Catabela y Salvadora, permitirá interpretar a través de simulaciones inversas (con PHREEQC), las reacciones químicas que tienen lugar entre el agua subterránea y el medio hospedante y que controlan las características del agua en el sector así como la movilidad de las especies presentes en ella.

2. Antecedentes generales

2.1 Ubicación y accesos

El área de estudio se ubica en la Región de Antofagasta, Provincia de Antofagasta, comuna de Sierra Gorda, localizado a 4,5 kilómetros de la ciudad de Sierra Gorda y aproximadamente a 55 kilómetros al suroeste de la ciudad de Calama (ver Figura 1).

El acceso al proyecto minero se realiza por la carretera Ruta 25 y luego por una camino privado de la compañía minera Sierra Gorda SCM. El rajo de la mina está ubicado a una cota aproximada de 1.700 m.s.n.m. y una vez construido, comprenderá una extensión de aproximadamente 5 km².

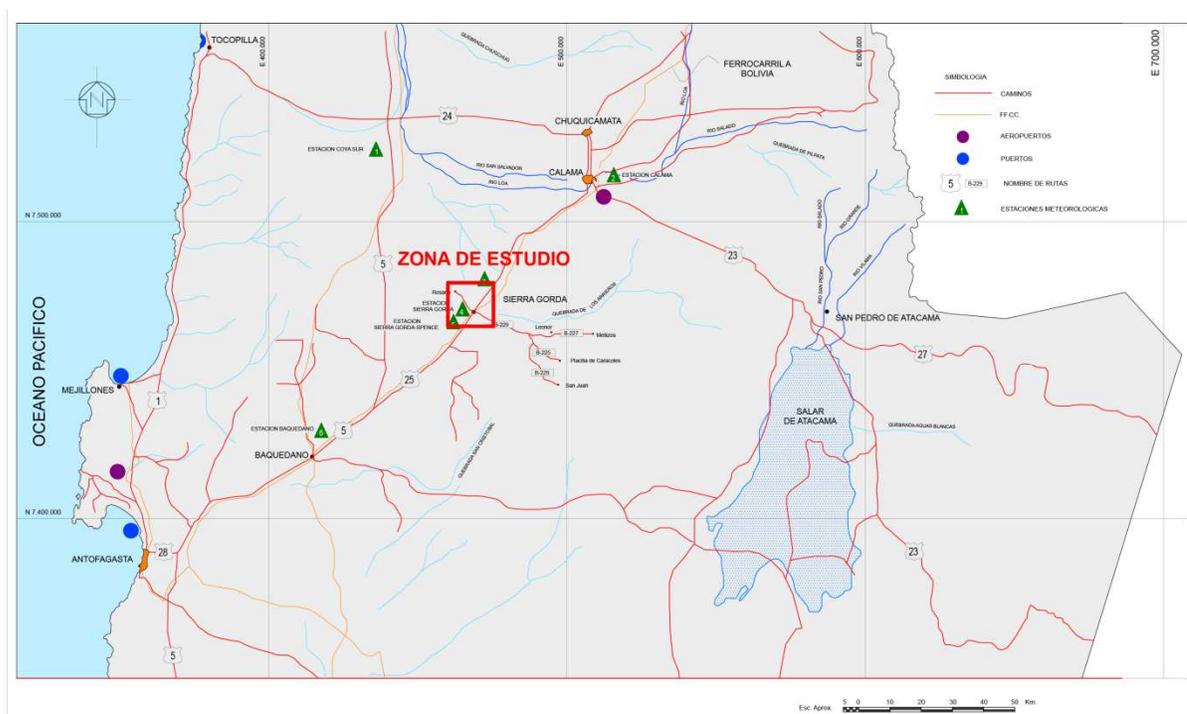


Figura 1. Zona de estudio. Modificado de atlas geográfico de Chile para la educación (IGM), 4 edición, 1994.

2.2 Antecedentes de trabajos previos

En 2004 se inició un amplio programa de perforación de sondajes en la concesión minera de Sierra Gorda, para en Agosto de 2011 dar inicio a la construcción del proyecto tras una completa

evaluación y prospección geológica que incluye litología, alteración, mineralización, geoquímica, geotécnica y estructuras.

En mayo de 2010 se presentó el estudio de Impacto Ambiental (EIA), donde se desarrolló la primera caracterización hidrogeológica de la zona de estudio, por Schlumberger Water Services (SWS). El estudio hidrogeológico incluyó el análisis de 41 pozos de observación, donde se registraron mensualmente datos del nivel freático, y 6 pozos de monitoreo en los cuales se hizo un muestreo trimestral de aguas para análisis químico, desde 2008. Este trabajo incluye ensayos hidráulicos (de inyección, slug y carga variable), para definir la permeabilidad del acuífero, así como 57 ensayos de Packer. Además, contiene planos de isocurvas de nivel freático y un modelo hidrológico que proyecta los flujos de agua tras la apertura del rajo de la mina.

Al presente, VAI Groundwater Solutions (VAIGS) prepara una actualización de la caracterización hidrogeológica de Sierra Gorda, informe para el cual ya se dispone de un nuevo mapa de isocurvas de nivel freático, realizado con datos de monitoreo en el periodo Marzo 2008 a Agosto 2013.

2.3 Clima

La región de Antofagasta se caracteriza por una marcada aridez, localizándose cuatro subtipos climáticos desérticos (ver Figura 2), dispuestos en franjas longitudinales: en el sector costero, con un clima desértico nuboso; en la franja intermedia con un clima desértico interior, ente los 2000 y 3500 m.s.n.m., con un clima desértico marginal; y finalmente un clima de estepa de altura, por sobre los 3500 m.s.n.m. (Fuente: Dirección meteorológica de Chile).

2.3.1 Clima desértico nuboso

Se extiende a lo largo de la costa y hasta 20 kilómetros al interior, siendo retenida la influencia marina por causa del relieve de la Cordillera de la Costa. Este subtipo climático se caracteriza por la presencia de abundante humedad, neblinas matinales y la ausencia de precipitaciones, observándose un leve aumento en las lluvias, hacia el sur del litoral. La corriente fría de Humboldt tiene un efecto modelador de las temperaturas.

2.3.2 Clima desértico normal

Este subtipo corresponde al clima desértico propiamente tal. La define una aridez extrema con ausencia de humedad y por tanto, sequedad atmosférica así como una amplitud térmica importante que va desde los 30°C en el día a 2°C en la noche. En zonas intermedias encerradas por la precordillera andina, se observan las condiciones más áridas del norte de Chile, sector conocido como Desierto de Atacama, con escasas precipitaciones y una humedad relativa inferior al 50%.

2.3.3 Clima desértico marginal de altura

Entre los 2000 y 3500 m.s.n.m., se observa una aridez extrema presentándose una mayor cantidad de precipitaciones en los meses de verano, con 20 a 60 mm anuales. Se caracteriza por la ausencia de humedad y carencia de nubes. La zona de estudio presenta este subtipo de clima.

Considerando el periodo 1990-2013, las estaciones meteorológicas Antofagasta, Baquedano y Sierra Gorda (ver ubicación en Figura 1), pertenecientes a la DGA, se ubican en la cuenca de la Quebrada Caracoles, la cual comprende el área de estudio. Estas estaciones registran los periodos más lluviosos en los meses de mayo-junio, observándose máximas anuales históricas (en 24 horas) de 17 mm. Se observa que en 24 años Sierra Gorda ha registrado tan solo en 5 años precipitaciones (Fuente: DGA).

2.3.4 Clima de estepa de altura

Este tipo de clima, desarrolla en los márgenes de los desiertos, tal como ocurre en la zona altiplánica o Puna, ubicándose sobre los 3500 m.s.n.m. Se caracteriza por bajas temperaturas, con una media anual de 2°C, y una amplitud térmica de más de 20°C. Las precipitaciones ocurren en los meses de verano y no sobrepasan los 100 mm anuales, las cuales disminuyen hacia el sur donde predominan las nevadas.

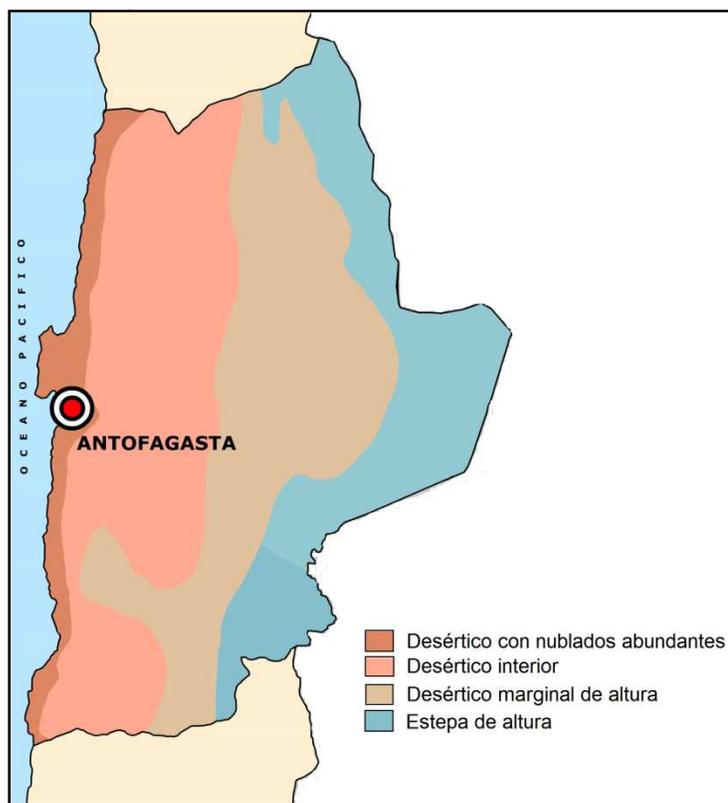


Figura 2. Tipos de clima en la región de Antofagasta. Modificada de guía climatológica práctica, dirección meteorológica de Chile.

2.4 Geomorfología

El área de estudio se ubica en la Depresión Intermedia (Llaumett, 1994), situado entre la Cordillera de la Costa al Oeste y la Cordillera de los Andes al Este, en el borde Este del Valle Intermedio (Sillitoe y McKee, 1996) y forma parte de una cuenca topográficamente baja rodeada por cerros de escasa altura del pre-altiplano. Las cotas de terreno varían aproximadamente de 1.625 m.s.n.m. hasta la cima de un pequeño cerro ubicado al sureste del rajo propuesto, a 1.785 m.s.n.m. El yacimiento se ubica en un sector plano rodeado de pequeños cerros (ver Figura 3). En general la geomorfología de la zona corresponde a extensas planicies con excepción de un cerro ubicado inmediatamente al sur, entre el área del proyecto y la comunidad de Sierra Gorda, cuya cima alcanza una altura de 1.850 m.s.n.m.

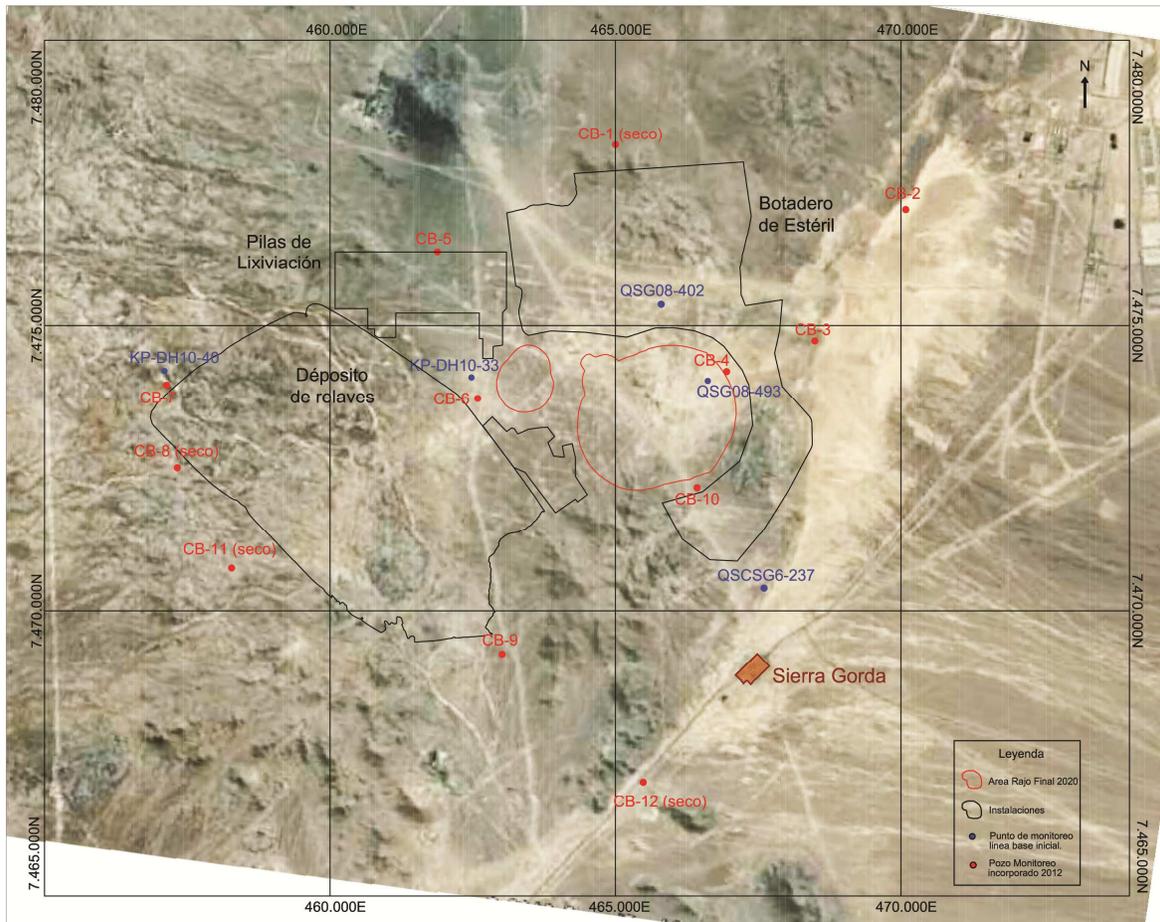


Figura 3. Área del proyecto minero Sierra Gorda.

2.5 Hidrografía

En la región de Antofagasta el principal flujo superficial de agua corresponde al río Loa con una extensión de 440 kilómetros desde su nacimiento en el volcán Niño, siendo el único curso fluvial que desemboca en el mar. La alimentación del río corresponde a un régimen mixto fluvionival, manteniendo un escurrimiento continuo de las aguas durante todo el año. El periodo de lluvias se concentra en el verano (diciembre-marzo) cuando llegan a la zona altiplánica masas de aire húmedas provenientes desde la cuenca amazónica, fenómeno conocido como invierno boliviano.

Los principales afluentes del río Loa se presentan en la localidad de Chiu-Chiu, como el río Salado, al norte el río San Pedro, que es el primer tributario cordillerano. Al poniente, el río cambia de dirección hacia la Depresión Intermedia, siendo el tercer afluente el río San Salvador que des-

emboca en el Loa, al norte del salar de Miraje. Finalmente al sur del salar de Llamara, el río Loa corre hacia el mar en dirección poniente.

Una característica importante de la región, desde un punto de vista hidrográfico, es la amplia presencia de salares así como de depósitos salitreros, sistemas conservados gracias a las escasas precipitaciones y altas tasas de evaporación.

La cuenca del acuífero de Sierra Gorda está conformada por las quebradas Caracoles y los Arrieros, ubicándose la zona de estudio en el extremo Oeste de la cuenca (ver Figura 4).

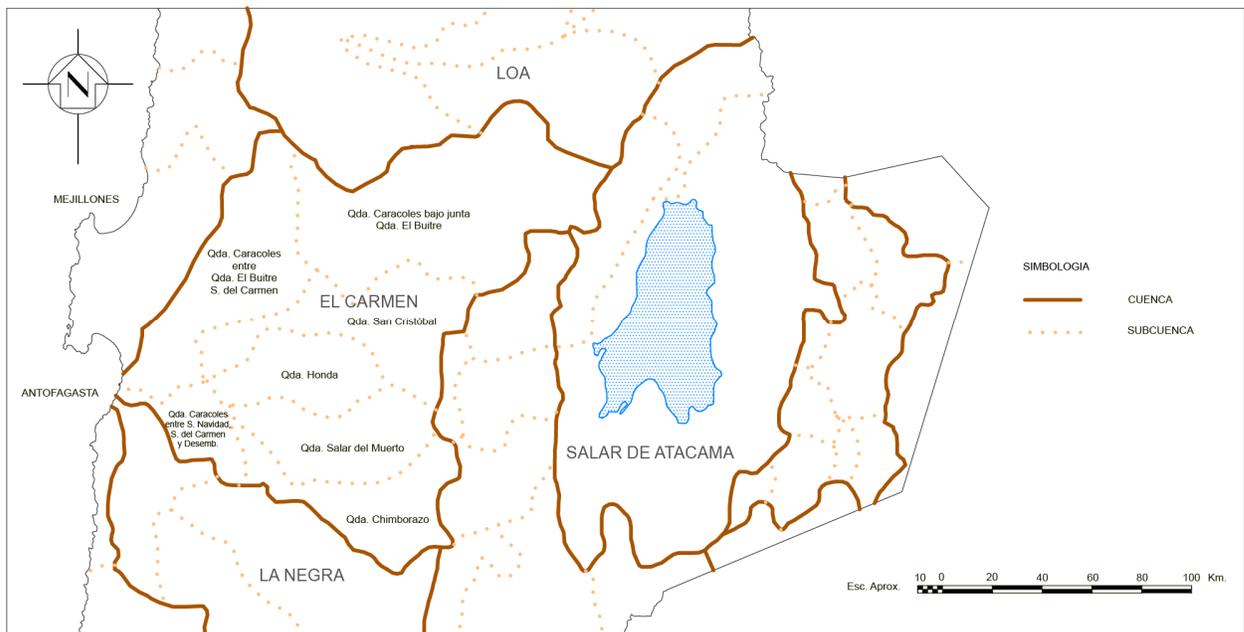


Figura 4. Mapa hidrológico regional. Modificado de división de subcuencas por regiones, DGA, 2000.

2.6 Hidrogeología Regional

A escala regional, se distinguen cuatro tipos de permeabilidades, definidas en el Mapa Hidrogeológico de Chile (ver Figura 5), escala 1:2.500.000 (DGA, 1986). Predominan permeabilidades muy bajas a ausentes en unidades rocosas así como permeabilidades secundarias en el altiplano.

La unidad de mayor importancia hidrogeológica corresponde a la de rocas volcánicas fracturadas que presenta permeabilidad secundaria, cubriendo extensas áreas en el Altiplano. También figu-

ran con una importancia relativa media, las rocas carbonatadas presentes en el acuífero de Calama, próximo al área de estudio. Las unidades con permeabilidades muy bajas a nulas corresponden a rocas plutónicas y volcánicas - sedimentarias.

La dirección principal de flujo es suroeste, observándose hacia el sur de la región un flujo orientado hacia el noroeste.

2.7 Hidrogeología del sector Sierra Gorda

La principal fuente de recarga del acuífero es la que ingresa por la Quebrada Los Arrieros, en el extremo oriental de la cuenca. Estas aguas escurren de manera subterránea en dirección suroeste hasta llegar a la zona de descarga, en el Salar del Carmen. Mapas de isoyetas muestran que las precipitaciones de la zona alta de la cordillera, son captadas por la Quebrada Los Arrieros, existiendo discrepancias entre los estudios publicados respecto a la recarga, variando entre 55 l/s y 125 l/s.

Se reconocen tres unidades de permeabilidad en la zona de estudio, en orden de mayor a menor permeabilidad: sedimentos aluviales y depósitos no consolidados, roca meteorizada y/o fracturada y basamento, encontrándose el nivel freático en la zona de permeabilidad de roca meteorizada y/o fracturada,

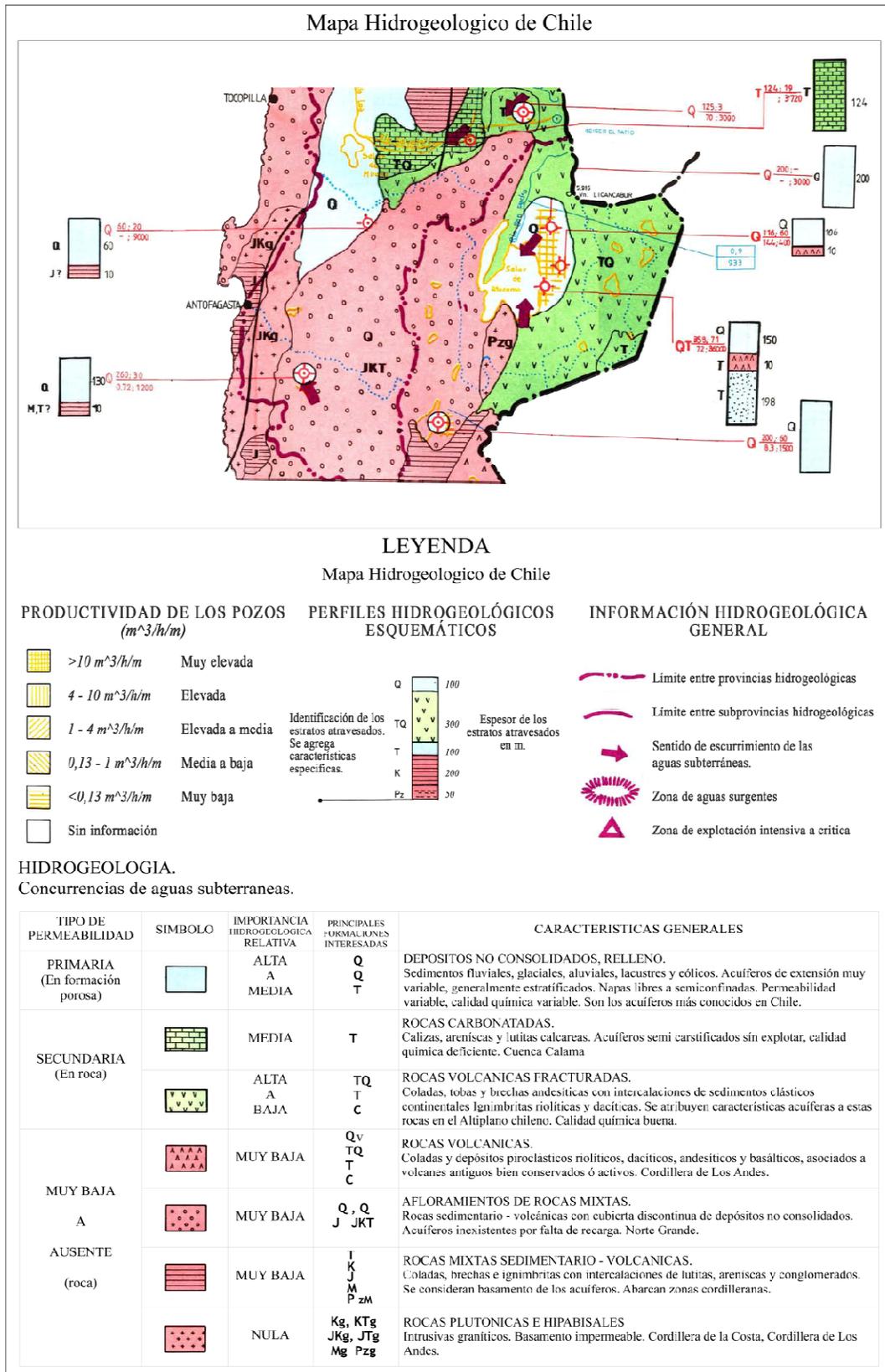


Figura 5. Hidrogeología regional. Modificado de Mapa Hidrogeológico de Chile, escala 1:2500000, 1986, Dirección General de Aguas.

3 Marco Geológico

3.1 Geología Regional

Según el documento "Geología y Yacimientos Metalíferos de la Región de Antofagasta" (SER-NAGEOMIN, 1990), la Región de Antofagasta, ubicada en el Norte Grande de Chile, corresponde a un segmento del flanco occidental de los Andes Centrales. Su posición geotectónica actual es la de un margen continental activo, la cual se mantiene al menos desde el Paleozoico Superior. Como consecuencia los procesos ígneos, relacionados a la subducción de corteza oceánica bajo el continente, han sido los dominantes en su evolución geológica. En contraste, la sedimentación y el metamorfismo han sido relativamente restringidos. Por otra parte, los procesos hidrotermales asociados a la actividad ígnea han generado un gran número de yacimientos metalíferos, específicamente de cobre, oro y plata, entre los cuales se cuentan algunos de los mayores pórfidos de Cu-Mo a nivel mundial.

Se registraron cinco etapas de actividad ígnea: Ordovícico a Silúrico, Carbonífero Superior a Triásico, Jurásico a Cretácico Inferior, Cretácico Superior a Oligoceno y Mioceno a Holoceno. Desde el Carbonífero Superior existieron frentes magmáticos elongados, en dirección meridiana, donde se verificó simultáneamente volcanismo y plutonismo calcoalcalino. Durante cada periodo de actividad ígnea, el frente magmático estuvo estacionario, pero su posición cambio de una etapa a la otra, destacando la migración sistemática hacia el este del frente magmático desde el Jurásico, la que fue precedida de etapas de deformación compresiva.

En la Figura 6, se presenta la distribución espacial de las principales unidades geológicas presentes en el área de estudio. Las unidades intrusivas se abordan en detalle en el subcapítulo de Geología Local.

Formación La Negra (Jln) (Jurásico Medio-Jurásico Superior) (García, 1967): Las rocas más antiguas del distrito corresponden a secuencias estratificadas de lavas amigdaloidales, basálticas y andesíticas, brechas volcánicas, conglomerados y areniscas del Jurásico Medio a Superior pertenecientes a la Formación La Negra, y distribuidas en el sector occidental del distrito. La secuencia volcánica presenta un espesor máximo de 800 m, sin que se reconozca su base. Las lavas son de color negro, con pátinas de oxidación rojizas y contienen grandes fenocristales de plagioclasa, con piroxenos y olivino, de menor tamaño. Comúnmente, presentan amígdalas de cuarzo y

clorita. En el sector de Inca de Oro están afectadas por alteración hidrotermal, sericítica y argílica, asociadas a sistemas de vetas de Cu-Au.

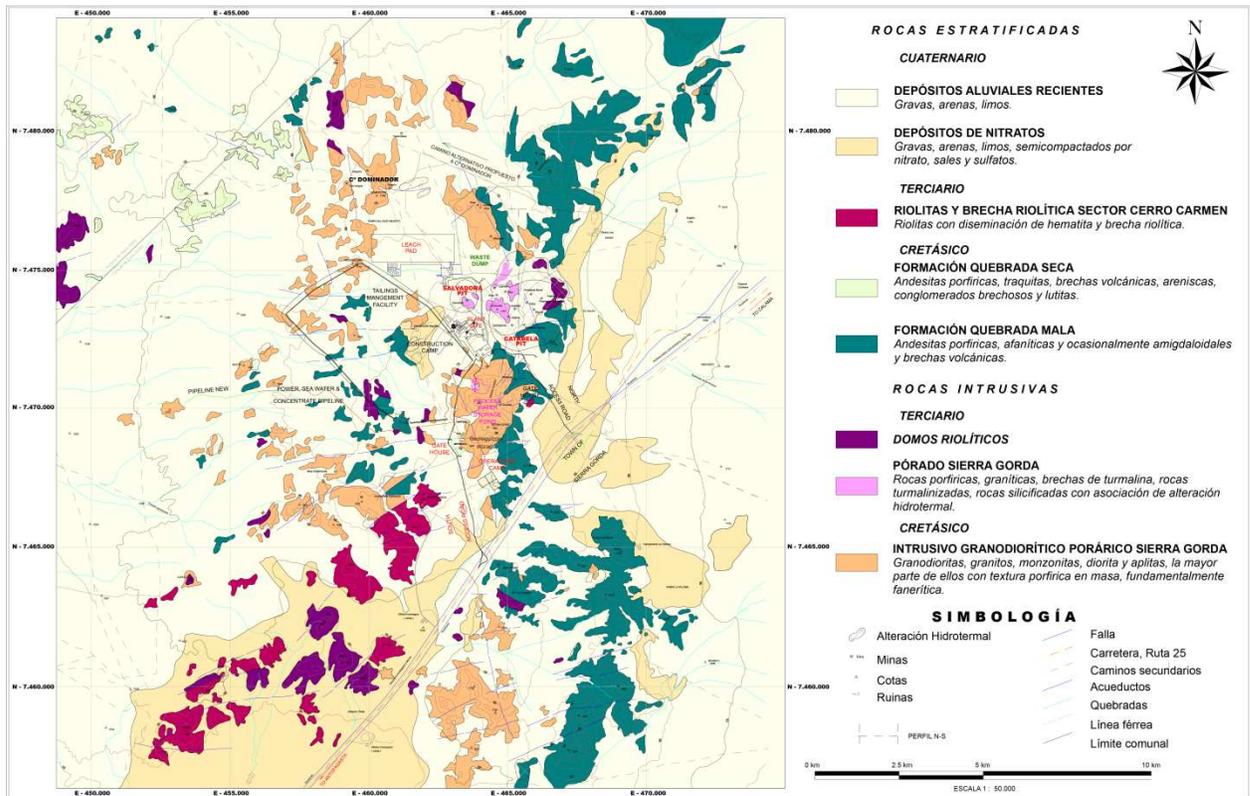


Figura 6. Mapa geológico proyecto Sierra Gorda. Autor Jorge Maya, Escala 1:50.000, actualizado año 2010. Modificado.

Formación Quebrada Mala (Neocomiano, SERNAGEOMIN): Intercalaciones volcánicas de rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas.

Depósitos aluviales recientes

Gravas de Atacama (Mga) (Mioceno) (Mortimer, 1973): Corresponde a una denominación informal de los depósitos polimícticos de gravas, generalmente no consolidados, que afloran en una gran extensión en la zona sur del Desierto de Atacama. Los depósitos presentan una coloración gris clara, de potencia variable entre 100 a 250 m, con estratificación métrica a decamétrica incipiente. Los componentes clásticos principales corresponden a rocas volcánicas mesozoicas, de proveniencia local, junto a rodados de calizas, areniscas y granitoides de proveniencia distal.

Depósitos aluviales “antiguos” (MsPla) (Mioceno Superior-Plioceno): Unidad estratigráfica informal que corresponde a los depósitos de gravas y bloques de coloración pardo-rojiza que, en

planta, preservan la morfología de grandes conos aluviales de baja pendiente, disecadas por una red de drenaje torrencial ocasional, y que sobreyacen, en leve discordancia de erosión, a las Gravas de Atacama.

Depósitos aluviales y coluviales (Qa-Qc) (Cuaternario): Corresponden a niveles y bancos alternantes de ripios, gravas y gravas arenosas, con frecuentes lentes de arenas gruesas y limos arenosos, característicos de depósitos de corrientes de barro, y a sedimentos de origen gravitacional y aluviones, de proveniencia local o “in situ”, adosados a laderas escarpadas.

3.2 Geología Local

3.2.1 Litología

En la Figura 7 se presenta el mapa de litología, a una elevación de 1572 m.s.n.m. saturada por aguas subterráneas, pertenecientes al acuífero estudiado (nivel freático a 1600 m.s.n.m. aprox.). Elipses negras representan aproximadamente, la ubicación del rajo Salvadora y Catabela. El área del proyecto comprende unidades geológicas de origen sedimentario aluvial, volcánico e ígneo intrusivo, las que se describen a continuación.

Sedimentos aluviales

Los depósitos aluviales corresponden a gravas y arenas finas con limo y arcillas, presentando nula a baja consolidación, donde el principal cemento corresponde a yeso, nitrato y sales. Estos depósitos datan del Terciario y el Pleistoceno. El espesor de estos sedimentos son variables en la zona del proyecto, alcanzando en el área del rajo proyectado, un espesor máximo de 21,3 m hacia el límite noreste del rajo, siendo mínimo en el sector sur. En el sector de Pampa Lina, se observan los mayores espesores de estos depósitos, con una potencia máxima de 64 m.

Rocas volcánicas e ígneas intrusivas

El basamento rocoso en el área de la mina consiste en andesita y tobas del período Jurásico, sienogranito intrusivo, monzogranito, monzonita y monzodiorita del período Cretácico y pórfido feldespático cuarcífero del Paleoceno/Eoceno. Las unidades de rocas pertenecientes al Jurásico corresponden a la Formación La Negra. Esta unidad de roca sufrió considerable alteración hidrotermal y lixiviación.

En el sector rajo se observa fundamentalmente rocas ígneas extrusivas, como andesita y toba, observándose hacia el limite oeste del rajo, la unidad Pórfido granodiorítico. Hacia el noreste del rajo se registran brechas hidrotermales, y en particular brechas de turmalina (ver Figura 7).

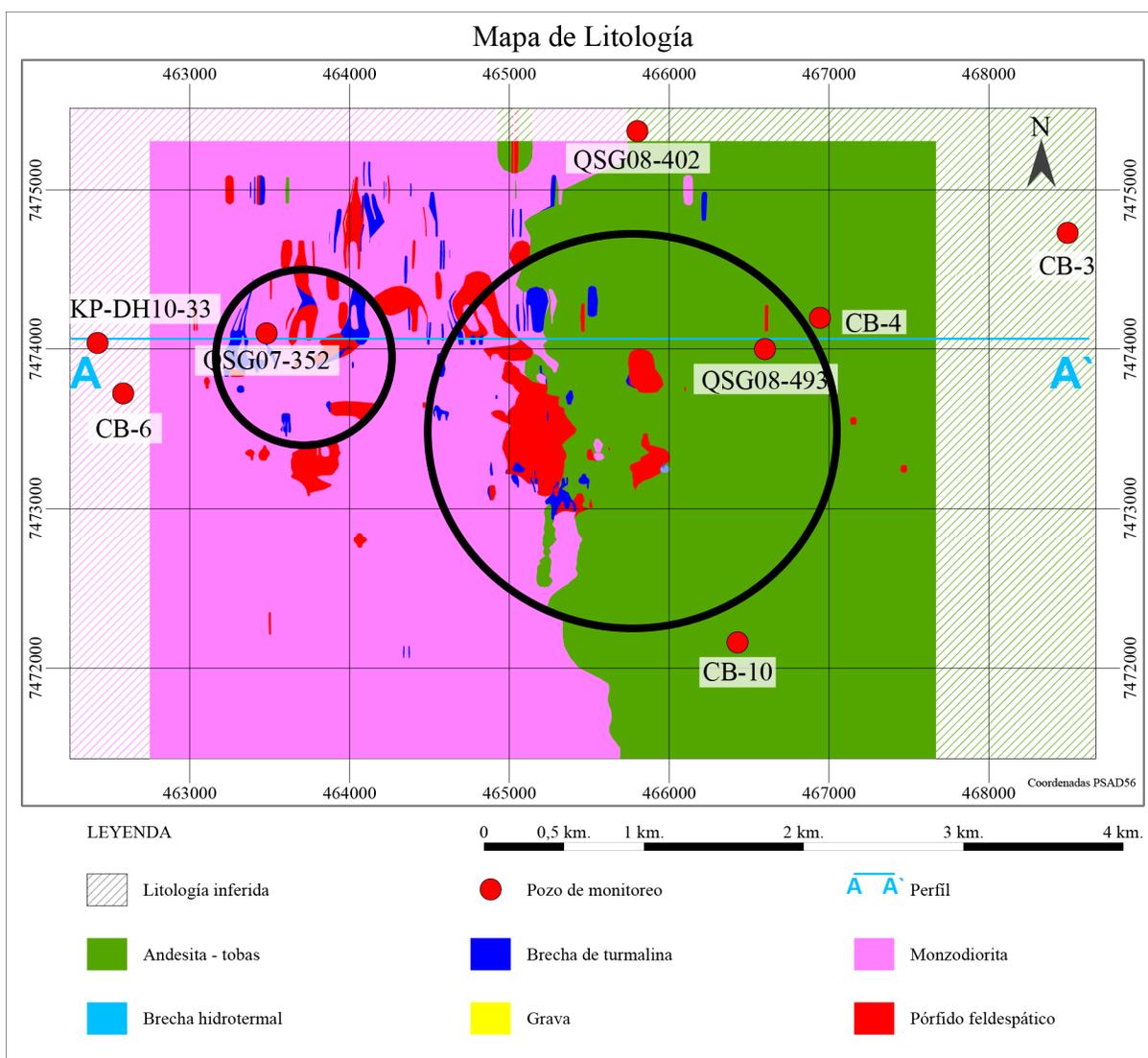


Figura 7. Mapa en planta cota 1572 m.s.n.m., litología proyecto Sierra Gorda. Modificado de modelo del yacimiento, 2014 (información proporcionada por SGSCM).

Sienogranito (SG): Se encuentra en varias partes del distrito, incluyendo el limite suroeste de los depósitos Catalina y Salvadora, así como cerca del depósito de San Armando. Se presenta gris y rosado con una textura gráfica, azucarada y de grano fino. Típicamente no-porfídica a débilmente porfídica (<5% de fenocristales), presentando ocasionalmente una alteración intensa a feldespato potásico hidrotermal.

Monzogranito (MG): Se encuentra en la vecindad de Catalina, especialmente en su lado occidental donde típicamente se dispone entre sienogranito y monzodiorita porfídica, presentando un contacto gradacional con dichas unidades. Se altera de manera intensa a feldespatos potásicos. Parece ser una variante del sienogranito, más rico en fenocristales, con un 5-15% de fenocristales de hornblenda, plagioclasa y en menor cantidad, biotita. La masa fundamental es de grano fino con una textura gráfica e intensa alteración a feldespatos potásicos.

Monzodiorita porfídica cuarzo soportada (MD): Presenta una forma de grano hipidiomorfa, con una textura típicamente porfídica en una masa fundamental de grano fino gráfica. En Salvadora y San Armando, está en contacto con sienogranito mientras que en Catalina, ocurre como un contacto gradacional con monzogranito, siendo la parte distal de un Plutón zonado que se extiende composicionalmente desde monzodiorita a sienogranito. Monzodiorita es la más rica en fenocristales (>15-20%), en comparación con monzogranito (~5-15%) o sienogranito (0-5%), observándose que el contenido de cuarzo generalmente disminuye con el aumento de fenocristales.

Granito (G): El granito ocurre principalmente en el área del depósito de Salvadora. Es de grano grueso, ±hornblenda-soportada, biotita, roca generalmente equigranular con 45 - 55 vol.% de feldespatos potásicos.

Pórfido granodiorítico (PG): Llaumett (1994) la describe como uno de los mayores cuerpos intrusivos en esta franja metalogénica, sin considerar el batolito principal, y observa que usualmente el pórfido granodiorítico se relaciona con importantes cuerpos mineralizados en el distrito. El mismo autor plantea un origen sub-volcánico para esta roca.

Pórfido feldespático (PF): Ocurre como diques. Hay dos variedades de texturas y edad para el PF: PF-gráfico (también llamado PF Temprano porque es una intrusión intramineral temprana) y PF-tardío, el cual corresponde a la última intrusión.

En resumen, se presenta un cuadro con dos etapas importantes de mineralización de las rocas intrusivas: un grupo de monzodiorita-monzogranito-sienogranito con textura gráfica y de grano fino a medio (0,1-2 milímetros) y un grupo de granodiorita porfídica - pórfido feldespático de grano fino aplítico- seriado a gráfico (0,01-0,1 milímetros) más típicos de intrusiones hipabisales.

Brechas ígneas e hidrotermales: en concomitancia con los múltiples episodios de intrusión que generaron los batolitos terciarios en Sierra Gorda, también se desarrollaron cuerpos de brecha ígnea e hidrotermal, siendo estos una característica distintiva del distrito.

Existe una amplia variedad de brechas en el área del proyecto, ya sea como relleno hidrotermal o pipas subcirculares, que son el resultado de episodios múltiples y violentos de fluidos magmáticos y/o de erupciones freatomagmáticas.

Brecha de intrusión: Muchos de los stock y de los diques que forman el complejo batolítico Terciario manifiestan brecha de intrusión a lo largo de sus bordes, en escala centimétrica. La brecha de intrusión se señala como 'BXI' por personal de Geología de Sierra Gorda.

3.2.2 Estructuras

Existen varias estructuras presentes en el área del proyecto, principalmente en forma de fallas que ocurren a escalas diferentes y, para efectos de análisis, están segregadas en cuatro grupos o conjuntos de fallas distintos (ver Figura 8):

- Existe un sistema de fallas conjugadas (NE-SO y NO-SE) localizadas en el rajo proyectado.
- Existe un sistema de fallas mayores con la misma orientación, pero de naturaleza más dispersa y con mayor dimensión.
- Existen fallas con orientación N-S que al parecer se encuentran a escala regional.
- Conjunto de fallas con orientación E-O y N-S, al parecer localizado en tres áreas del proyecto. Este cuarto conjunto de fallas no parece estar relacionado con los otros tres conjuntos mencionados anteriormente.

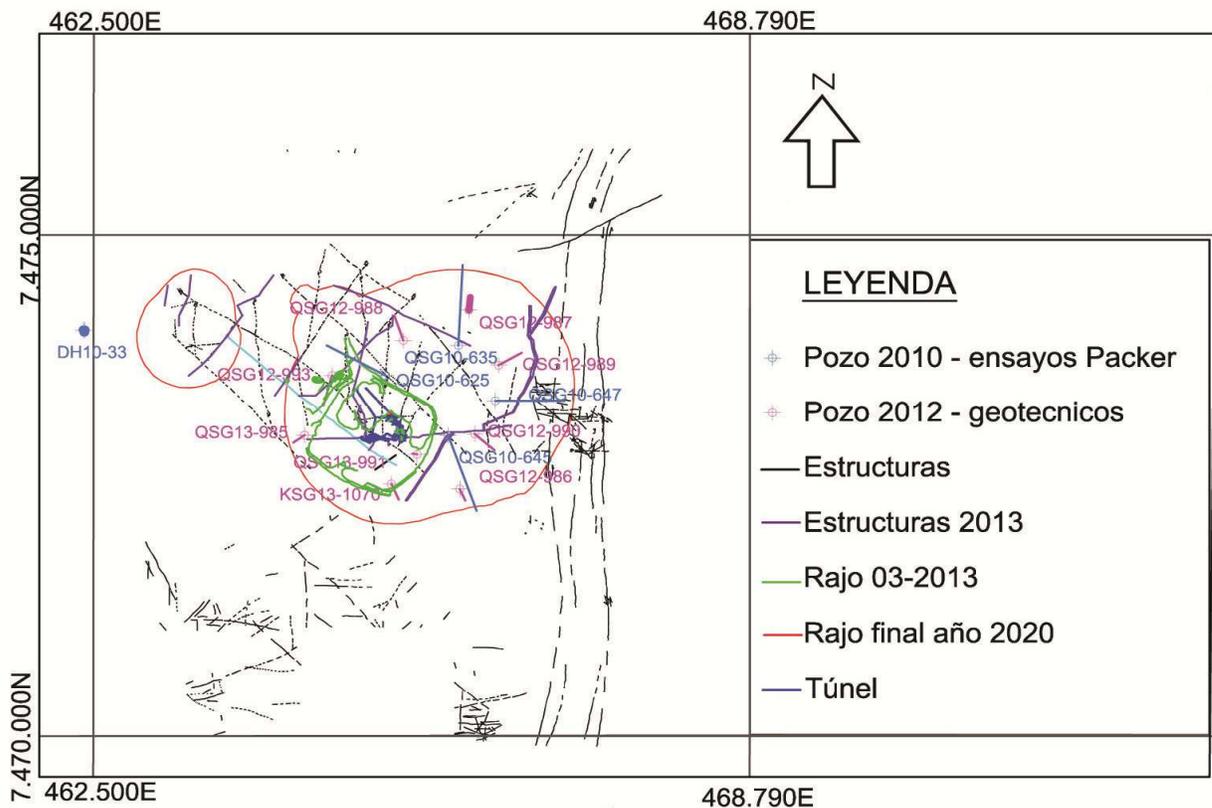


Figura 8. Estructuras en área de estudio.

El primer conjunto de fallas mencionado ha sido mapeado por Minera Quadra, a través de las campañas de perforaciones realizadas como parte del trabajo desarrollado para el Proyecto Sierra Gorda. Estas fallas más localizadas ocurren en el área principal del rajo propuesto y tienen una orientación ortogonal conjugada. Estas incluyen fallas con orientación NE-SO acopladas con sus contrapartes con orientación NO-SE. Estas fallas serían localizadas y presentan un ángulo relativamente grande. En planta, estas fallas parecen describir un patrón romboide reticulado y están, con mayor probabilidad, relacionadas con las rocas intrusivas y la brechización. En la investigación geotécnica del túnel de exploración, la agrupación de fallas dominante mapeada en la subsuperficie presenta una orientación N35°O. Esta es la misma orientación de numerosas fallas mapeadas en otros lugares del área del Proyecto.

Asociada a las fallas descritas anteriormente, existe una segunda serie de fallas mucho más largas que se supone atraviesan el área del Proyecto y tienen las mismas orientaciones NE-SO y NO-SE que las fallas descritas anteriormente. Debido a su misma orientación, en alguna medida están relacionadas con el conjunto de fallas más local, pero están más dispersas y son más largas.

Algunas de estas fallas tienen unos pocos kilómetros de longitud y se han inferido en gran medida a partir del mapeo de terreno.

Existe un tercer conjunto de estructuras regionales más largas y más penetrantes, con orientación N-S, que ocurren a lo largo del margen oriental del rajo propuesto para la mina. Existen dos pequeños cerros ubicados inmediatamente al sureste del rajo Sierra Gorda, de los cuales el más alto tiene aproximadamente 100 m de altura. Ambos tienen pronunciadas orientaciones N-S. Es probable que, debido a la meteorización diferencial a lo largo de los conjuntos de grietas o fracturas concurrentes con el fallamiento en dirección N-S, estos cerros tengan esta orientación preferencial.

Al parecer existe una relación entre Pampa Lina y la zona de fallas N-S. Pampa Lina es una amplia área plana ubicada aproximadamente a un kilómetro al este del rajo propuesto Sierra Gorda. La geomorfología asimétrica del salar de Pampa Lina es atribuible probablemente a la zona de fallas en dirección N-S. Las grandes fallas de desplazamiento de rumbos regionales, curvilíneas y penetrantes tales como éstas, son endémicas y características de la región. A lo largo de esta zona de fallas N-S, el salar parece estar ubicado en declive en relación con el área del Proyecto y actúa como una depresión tipo graben. Esta zona de fallas de desplazamiento de rumbo con orientación N-S está ubicada a lo largo del margen este del área del Proyecto y ha sido mapeada como una falla con sentido de movimiento siniestro (izquierdo en relación con derecho). La zona de fallas está orientada con un gran ángulo en relación con el flujo de agua subterránea.

El cuarto conjunto de fallas ocurre a lo largo de los márgenes norte, sur y este del área del Proyecto. Estas fallas están orientadas en dirección N-S y E-O y se observan muy localizadas en cada sub-área. En los márgenes norte y sur del área del Proyecto, estas fallas ocurren en monzogranito. En el margen Este, estas fallas presentan una orientación predominantemente E-O y ocurren en andesita. Este pequeño conjunto de fallas ubicado en el margen oriental parece presentar una orientación sub-paralela al flujo de agua subterránea.

3.2.3 Alteración

La parte central del distrito de Sierra Gorda, contiene una zona de rocas alteradas y localmente, mineralizadas, de alrededor de 13km de largo y entre 1 a 3km de ancho, elongado en el sentido norte-noreste. El cinturón se desarrolla a lo largo de los contactos entre intrusiones hipabisales y

rocas volcánicas. Su geometría y extensión está parcialmente controlada por un sistema de fracturas relacionadas a fallas.

En la Figura 9 se presenta el mapa de alteración, a una elevación de 1572 m.s.n.m., nivel saturado por aguas subterráneas, pertenecientes al acuífero estudiado (nivel freático a 1600 m.s.n.m. aprox.). Elipses negras representan aproximadamente, la ubicación del rajo Salvadora y Catabela.

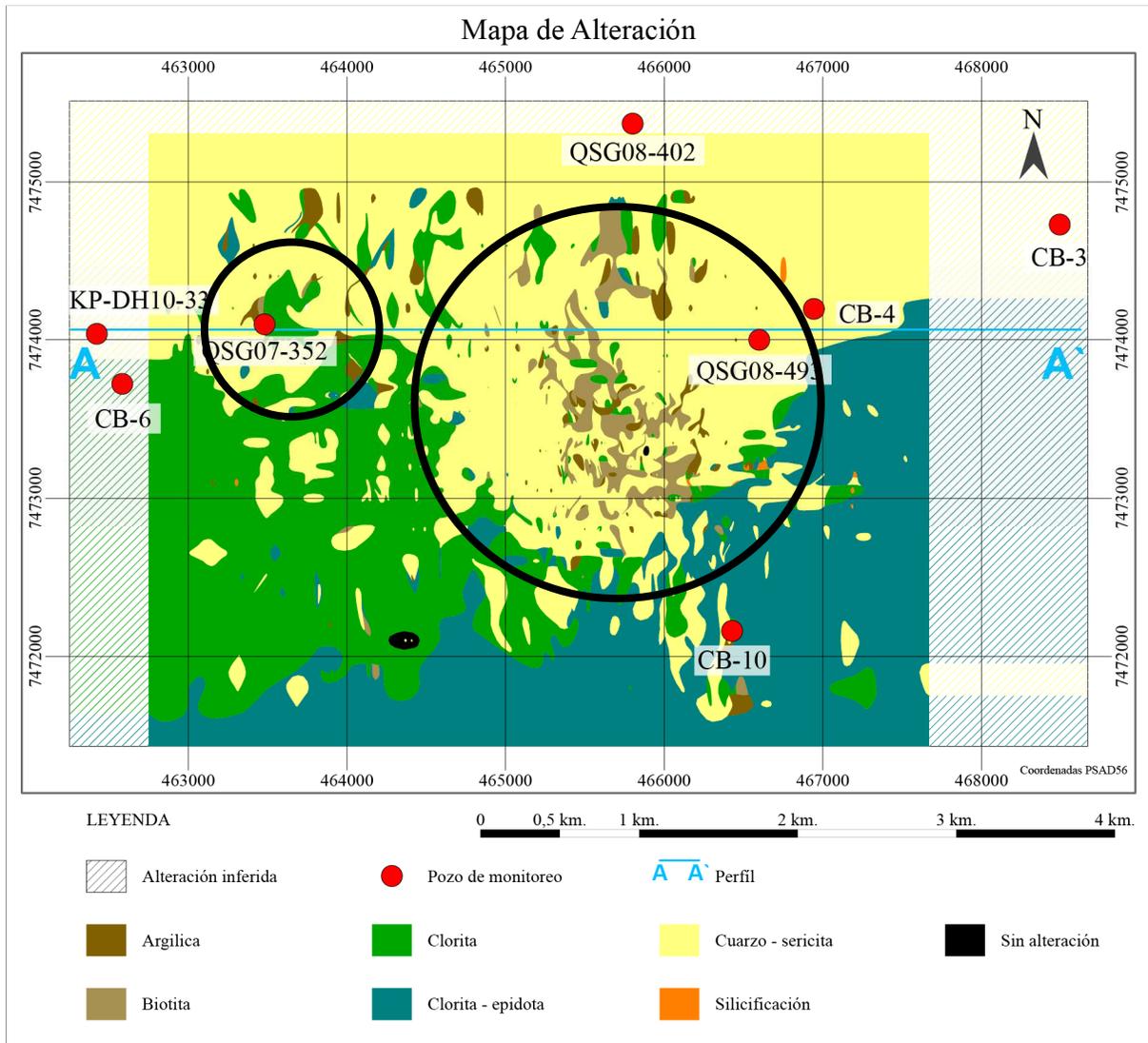


Figura 9. Mapa en planta cota 1572 m.s.n.m., alteración proyecto Sierra Gorda. Modificado de modelo del yacimiento, 2014 (información proporcionada por SGSCM).

Se identifican en las rocas volcánicas hospedantes de la alteración y mineralización, a lo menos 20 distintos episodios de vetas hidrotermales, determinadas por relaciones de contacto (de las

vetas). Los tipos de vetas se agrupan, según la asociación mineral contenida así como las características de los halos de alteración (Ristorcelli et al, 2008).

Vetas tempranas presentan cuarzo, turmalina, o magnetita-feldespatos (albita, \pm cuarzo, \pm feldespatos potásicos), con o sin halos de los mismos minerales. Vetas levemente posteriores, definen un evento silicatado-potásico, el cual contiene principalmente biotita y/o feldespatos potásicos como relleno o halos. Asociado al feldespatos, en este evento, se presenta la mayoría de la molibdenita presente en el depósito. Esto último se observa preferentemente en rocas intrusivas, especialmente en sienogranito, pórfido granodiorítico y pórfido feldespático. Aparentemente ni la calcopirita o la pirita, fueron depositados en un volumen importante en estas vetas.

Alteración biotítica con un estilo pervasivo también se encuentra presente, relacionada a vetas de alteración potásica. Biotita secundaria se dispone disseminada afectando grandes volúmenes de toba y andesita.

Vetas con clorita-sericita-anhidrita \pm arcillas o esta asociación en halos, es posterior a las vetas silicatadas potásicas. La mineralización de cobre parece estar asociada a esas vetas, las cuales representan una etapa de alteración fílica débil o argílica intermedia. Se discute si el origen de las arcillas presentes en esta asociación, ocurrió en una etapa hipógena o supérgena. Clorita disseminada se extiende ampliamente a escala regional, especialmente en las rocas volcánicas del Cretácico, asociándose con epidota en sectores próximos a depósitos minerales, formando una alteración propilítica. Las vetas de epidota están asociadas con un máximo de 1% de pirita en veta y disseminada, así como en menor medida de calcopirita. La alteración propilítica, generalmente se encuentra cortada por vetas de clorita-sericita, pudiendo ser contemporáneas o localmente tardías respecto de vetas con alteración sílice-potásica.

Con una textura destructiva, se observa un evento de alteración con la asociación cuarzo-sericita-pirita, siendo posterior a la alteración potásica-sílice, clorita-sericita (fílica), y clorita-epidota (propilítica). Una asociación tardía de vetas de base-metal con cuarzo-pirita-calcopirita (\pm esfalerita, galena y/o arsenopirita) con halos sericiticos, corta las vetas cuarzo-sericita-pirita. En fracturas posteriores se observan carbonatos hidrotermales, como siderita o dolomita, así como yeso supergeno.

La secuencia general descrita, corresponde a la serie paragenética que caracteriza el enriquecimiento de oro en pórfidos de cobre, identificado por Sillitoe (2000). La secuencia de vetas descri-

ta, también es bastante similar a la reconocida por Perello (2004) para el sistema porfirico de Esperanza, el cual se ubica a 25km al este-sureste del distrito Sierra Gorda.

3.2.4 Mineralización

El cinturón mineralizado en el cual el yacimiento de Sierra Gorda se ubica, tiene una dimensión en torno a los 13km, en la dirección noreste. Este contiene al menos tres grandes sistemas hidrotermales con una mineralización hipógena significativa de cobre-molibdeno: Sierra Gorda, Pampa Lina y Spence. En Sierra Gorda, un gran volumen de mineralización hipógena de sulfuros de cobre está acompañado de importantes depósitos de óxidos de cobre y en menor cantidad, sulfuros supergenos de cobre, el cual es resultado de procesos de meteorización durante el Terciario, sobre la mineralización hipógena temprana.

En la Figura 10 se presenta el mapa de mineralización, a una elevación de 1572 m.s.n.m. saturada por aguas subterráneas, pertenecientes al acuífero estudiado (nivel freático a 1600 m.s.n.m. aprox.). Elipses negras representan aproximadamente, la ubicación del rajo Salvadora y Catabela.

La zona hipógena de la mineralización de cobre se encuentra oxidada a profundidades cercanas a 150m. Mayoritariamente, la oxidación de sulfuros se produjo en su totalidad cerca del nivel freático y la zona de transición presenta una oxidación parcial. Bajo contenido de pirita y ganga neutralizadora restringe el movimiento del cobre y limita el desarrollo de grandes cuerpos de enriquecimiento supérgeno de sulfuros (Ristorcelli et al, 2008).

Mineralización de cobre en la zona oxidada ocurre en tres formas: como minerales verdes de cobre, especialmente sulfatos y carbonatos, cobre en limonitas y sulfuros supergenos.

La mineralización de sulfuros hipógenos fue modificada por procesos supergenos durante los 44Ma y los 14Ma. Sin embargo, un horizonte bien desarrollado de enriquecimiento de calcosina no está presente, observándose en cambio una cantidad significativa de calcosina en torno. localmente. al nivel freático actual. En la mayoría de la propiedad minera, la mineralización de sulfuros fue oxidada en el lugar y el cobre ocurre como sulfatos de cobre y óxidos. A continuación, se detallan las fases presentes en las zonas mineralizadas descritas.

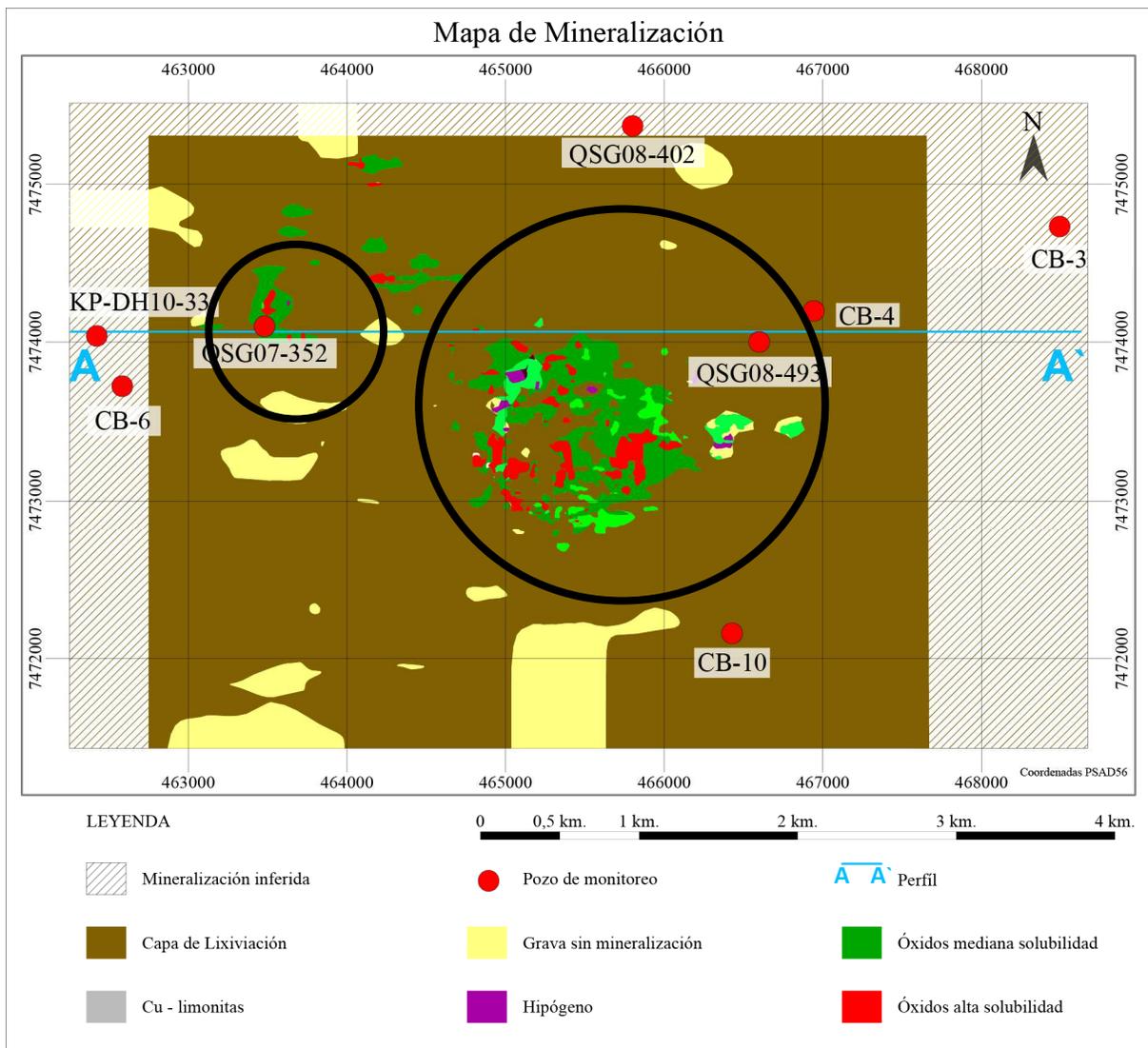


Figura 10. Mapa en planta cota 1572 m.s.n.m., mineralización proyecto Sierra Gorda. Modificado de modelo del yacimiento, 2014 (información proporcionada por SGSCM).

Mineralización hipógena de sulfuros: Conformar la mayor parte de la mineralización, en cuanto a volumen como a contenido de metal. Consiste fundamentalmente en calcopirita, observándose localmente el mineral bornita como accesorio. Las rocas con calcopirita se ubican bajo la zona lixivada hasta el límite de los sondajes existentes (1km bajo superficie). Molibdenita hipógena ocurre en distintos cuerpos, en Catalina y Salvadora; en otros sectores es débil a ausente. El oro, cuando ocurre, típicamente acompaña al cobre. Esta mineralización se presenta principalmente en vetas, pero también diseminado. Los principales sulfuros primarios son calcopirita, pirita y localmente molibdenita con bornita. Estimaciones volumétricas del porcentaje de sulfuros y en particular de pirita, son bajas (en torno al 3%) comparado con sistemas de pórfido cuprífero típicos.

Lixiviado/zona de óxidos: es el producto de oxidación in situ de los sulfuros hipógenos. La zona lixiviada se extiende desde la superficie hasta profundidades variables de hasta 200 m. y está agrupado entre zonas ricas en cobre, zona de cobre-lixiviado y zona de estériles. El transporte del cobre en la zona oxidada, Tras la lixiviación, el cobre fue removido de la roca u oxidado in situ, dependiendo su transporte en la zona oxidada de la litoquímica local, contenido de sulfuro primario y mineralogía, así como hidrología la cual está controlada por estructuras, ocurriendo en extensas áreas la oxidación in situ de cobre. Molibdenita hipógena se oxida por lo general a ferri-molibdenita, observándose que la distribución primaria de metales ha sido, aparentemente, poco afectada por la oxidación.

Llaumentt (1994) observa relictos de calcosina en la zona oxidada de Salvadora y Catalina (los dos rajos proyectados en Sierra Gorda), la cual interpreta como un indicador de la existencia de una zona de enriquecimiento secundario temprana, la cual fue posteriormente oxidada como resultado de un descenso en el nivel freático.

Los óxidos de cobre más importantes son: atacamita ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$), brocantita ($\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$), crisocola y vermiculita (Cu sustituye el K en biotita). En rocas ácidas, la atacamita representa más del 70% de cobre en la zona lixiviada. En rocas más básicas como la andesita, la atacamita es responsable por el 30 a 50% del cobre.

Zona supérgena de sulfuros de cobre: es una zona irregular y discontinua de enriquecimiento secundario de sulfuros de cobre, dominado por calcosina. Tiene un espesor variable de entre 10 a 150 m y generalmente ocurre en el límite entre la zona oxidada y la zona hipógena, pudiendo existir incluso más abajo, en la zona hipógena o a cierta distancia de este límite, en la zona oxidada.

La mineralización supérgena en Catalina tiene un espesor de entre 16 a 150 m, la cual depende de la razón pirita/calcopirita del nivel lixiviado. En algunos sectores se observa una relación entre la mineralización supérgena y estructuras, las que probablemente controlaron el movimiento de fluidos supérgenos.

La mineralización supérgena en Salvadora ocurre fundamentalmente en dos brechas: la brecha Olvidada y brecha Salvadora, ambas con características diferentes. La brecha Salvadora se encuentra principalmente alojada en un pórfido monzodiorítico, el cual contiene bolsones irregulares de mineralización de óxidos con una pequeña porción de enriquecimiento secundario. La bre-

cha Olvidada se encuentra en sienogranito y tiene un alto contenido de pirita, hallándose en su parte superior completamente lixiviada. Bajo la zona de lixiviación se encuentra una amplia zona de enriquecimiento secundario.

La principal mena es calcosina (Cu_2S). Otros minerales, localmente importantes, son covelina (CuS), digenita (Cu_9S_5) y bornita ($\text{Cu}_5\text{Fe}_{2+}\text{S}_4$). También ocurre oro en asociación con pirita, calcopirita y magnetita.

4. Marco Hidrogeológico

4.1 Hidrogeología General

El agua subterránea y su flujo dentro del cuerpo mineralizado de Sierra Gorda está relacionada a la permeabilidad asociada a los sistemas de fallas y fracturas que afectan al cuerpo rocoso. El dominio de estructuras principales del sector del rajo está orientado principalmente NE-SW y NW-SE. La permeabilidad de las rocas del cuerpo mineralizado está controlada fuertemente por los tipos de alteración, mineralización y por la distribución de fracturas y fallas de los sistemas principales.

El agua subterránea se mueve lentamente por las fracturas y espacios de poros interconectados, desde las zonas de recarga, situadas al norte y este de la mina, hacia el suroeste. La recarga se produce por la infiltración a partir de precipitación y deshielos, y ocurre principalmente en las altitudes más elevadas de la cordillera alta (NE del área de estudio). Existe una salida, de una cantidad pequeña de agua subterránea, desde los pozos de bombeo ubicados en el sector de Pampa Lina (Figura 15).

De acuerdo a los antecedentes recopilados, el caudal de extracción otorgado en la Cuenca Sierra Gorda, aguas arriba del emplazamiento del rajo, corresponde a 40,3 l/s y aguas abajo de las instalaciones mineras los caudales otorgados ascienden a 1,0 l/s.

En la Figura 13 se presenta la ubicación de los sondajes utilizados para la caracterización hidrogeológica. Los resultados de la compilación y análisis de la información hidrogeológica indican la presencia de agua subterránea almacenada en un sistema de baja permeabilidad en el área de la mina. Este acuífero no es confinado y está formado por rocas fracturadas y depósitos aluviales (sector Pampa Lina). Se asume que la permeabilidad de agua subterránea es menor a mayores profundidades debido a la disminución de la cantidad y tamaño de las fracturas con la profundidad.

Los resultados de las pruebas hidráulicas indican, por lo general, que el basamento posee muy baja permeabilidad, por lo cual su capacidad de transmitir agua es limitado. Por otro lado, la capa superior de roca, que se encuentra fracturada y meteorizada, presenta una mayor permeabilidad que la obtenida a mayores profundidades.

De acuerdo a las secciones litológicas proporcionadas por SGSCM, en la zona del proyecto existe una delgada capa de depósitos aluviales. Esta capa se profundiza hacia el sector de Pampa Lina. Los sedimentos de relleno aluvial, en esta cuenca, conforman la unidad de mayor permeabilidad. Esta zona coincide con la ubicación de gran parte de los pozos de bombeo que tienen derechos concedidos.

De acuerdo a la piezometría medida del nivel del agua subterránea, en la zona de las futuras instalaciones mineras, presenta una cota hidráulica entre 1.605 a 1.585 msnm (Figura 14). En el sector de las futuras operaciones mineras la profundidad del nivel varía entre 50 y > 100 metros bajo superficie (mbs). En el sector del futuro rajo la profundidad del nivel varía entre 70 y 100 mbs. El gradiente hidráulico es muy plano salvo en la zona donde se ubica el túnel de exploración.

Los niveles monitoreados, muestran una tendencia estable en sus registros. Esto coincide con la ausencia de precipitaciones en la zona indicando que no hay una recarga directa en este sector y validando la estabilización de los niveles producto del equilibrio del sistema hídrico.

Se presume que la recarga natural derivada de las infiltraciones de la precipitación en la zonas altas de la cuenca es eventual y se produce durante los meses de invierno altiplánico.

4.2 Hidrogeología Local

La cuenca Sierra Gorda se encuentra ubicada aproximadamente a 40 km al SW de Calama. En la Figura 11 se presenta el área aportante a la cuenca del acuífero Sierra Gorda, la cual abarca una superficie de 2.408 km^2 y su cota promedio es de 2.919 m.s.n.m.. La mayor elevación en esta cuenca se presenta en el sector Este alcanzando un valor de 3.800 m.s.n.m., las menores elevaciones se encuentran en el noroeste con un valor de 1.400 m.s.n.m.. La cuenca drena principalmente en dirección NE, desde el SW, y está conformada por las quebradas Caracoles y Los Arrieros.

En el sector NW de la cuenca se encuentra la faena minera de Sierra Gorda, ubicada específicamente al SE de Pampa Lina. El sector forma parte de una cuenca topográficamente plana rodeada por cerros bajos en el pre-altiplano. El área aportante directamente a las instalaciones, correspondiente a una sub-cuenca de la cuenca Sierra Gorda, tiene un área aproximada de 354 km^2 y su cota promedio es de 2.136 msnm.

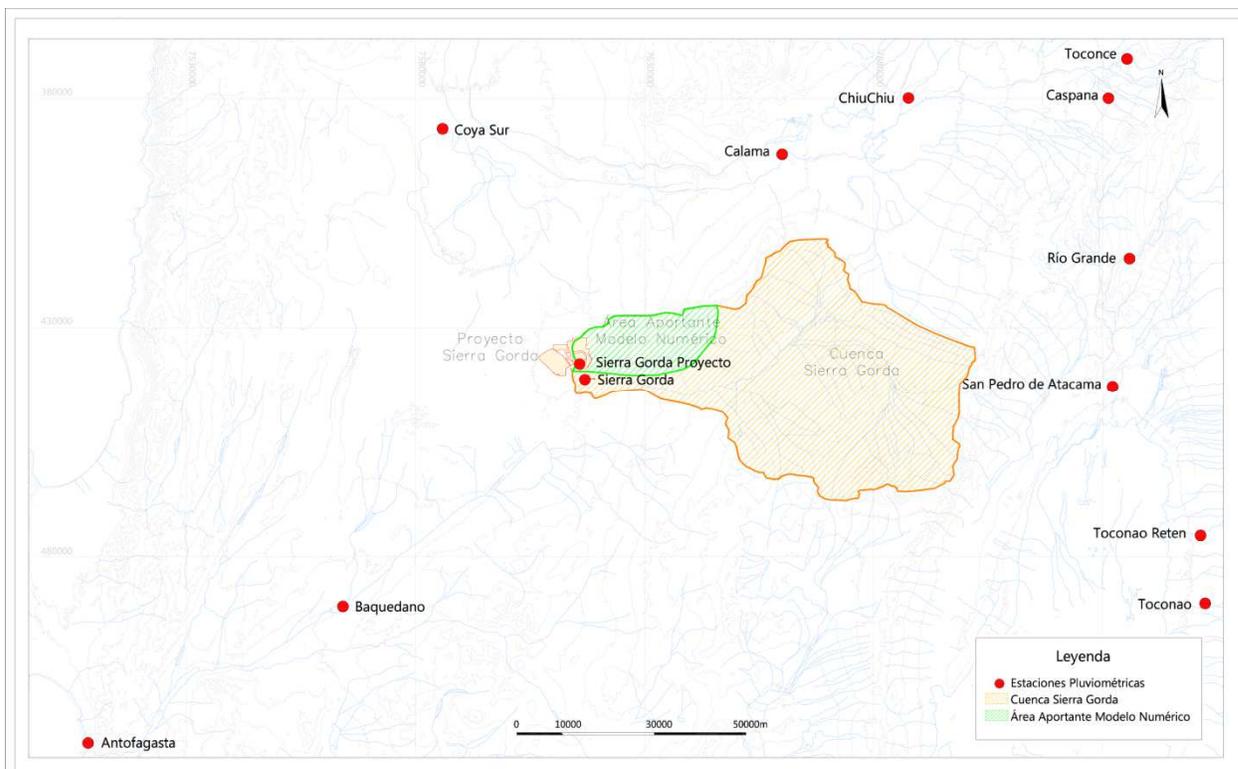


Figura 11. Cuenca Sierra Gorda. Modificado de actualización hidrogeológica proyecto Sierra Gorda, VAIGS, 2014.

Se debe señalar que esta cuenca difiere de la considerada para el Estudio de impacto ambiental del proyecto Sierra Gorda, debido a la nueva información topográfica proporcionada por Sierra Gorda. En base a esta nueva topografía se redefinieron los límites de la cuenca y se pudo acotar la cuenca aportante directamente al proyecto, sector rajo (VAIGS, 2014).

4.2.1 Unidades de permeabilidad

Los sondajes con los que se definieron las permeabilidades en 2010, se concentran principalmente en las cercanías de los rajes proyectados, futuras instalaciones y a algunos sondajes de aire – reverso ubicados en la cuenca de Pampa Lina. Una redefinición de las unidades de permeabilidad, se realiza en base al mapeo de los testigos de sondajes cuyas posiciones se indican en Figura 12.

La información hidrogeológica de la inspección de testigos, ensayos hidráulicos de terreno y los niveles de agua subterránea monitoreados representan la fuente de datos disponible para determinar las propiedades hidrogeológicas relativas a las unidades que comprenden el sistema acuífero.

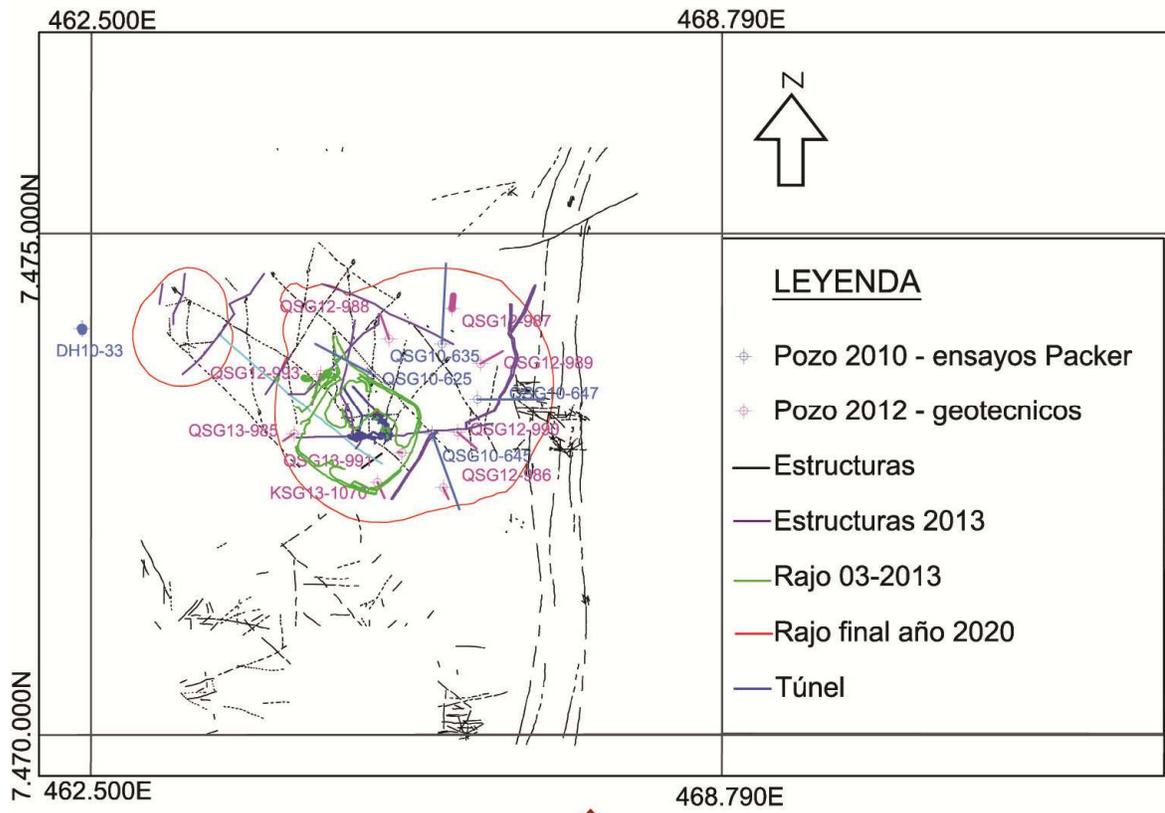


Figura 12. Ubicación de sondajes geotécnicos utilizados para redefinir permeabilidades.

Las unidades de permeabilidad presentes en el área del proyecto están caracterizadas por tres unidades principales y son las siguientes:

- Depósitos aluviales.
- Unidad de roca meteorizada y/o fracturada.
- Unidad de basamento.

La definición de estas unidades consideró las permeabilidades obtenidas en las pruebas hidráulicas. En los siguientes párrafos se detalla la distribución espacial de las unidades en el área de interés.

Depósitos aluviales

En toda el área del proyecto se encuentra de forma superficial la unidad de depósitos aluviales formados por arenas y gravas, no consolidadas a moderadamente consolidadas. El espesor de la unidad varía entre 6 y 160 m en Pampa Lina. Los depósitos aluviales afloran principalmente en el área de Pampa Lina y fueron detectados en todos los sondeos de exploración ubicados al Este del Botadero de Estéril.

El espesor de los depósitos aluviales dentro del área mina se presenta en un rango que va desde los 6 m a los 26 m, entre la zona oeste y al poniente del principal control estructural identificado en la zona de estudio (sistema de fallas de rumbo, N-S), con un espesor promedio de aproximadamente 13 m.

Al Este del control estructural, el espesor de los depósitos aluviales presenta un rango que va desde los 22 m a los 64 m, con un espesor promedio de aproximadamente 42 m.

El análisis de las descripciones litológicas de los pozos de exploración y la revisión del testigo indican que el espesor de los depósitos aluviales aumenta hacia el este. Según el informe “Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Spence” en la zona de Pampa Lina, la potencia del material aluvial varía en dirección Oeste-Este desde los 50 m hasta alcanzar una potencia mayor a los 160 m.

Los depósitos aluviales es la principal unidad de permeabilidad en el acuífero. La recarga proveniente de las zonas de mayor altura se almacena en esta unidad y se mueve lentamente por las fracturas alcanzando el macizo rocoso. Durante la investigación de terreno, se observó que los depósitos aluviales tienen un moderado potencial de transmisión de agua. Esto contrasta con la capacidad del basamento rocoso adyacente, que sólo tiene una capacidad limitada.

Los depósitos aluviales en el área de las instalaciones mineras tienen una importancia menor por su condición no-saturada. De acuerdo a las mediciones del nivel freático la unidad de depósitos aluviales se encuentra seca. Depósitos aluviales saturados se observaron solamente en el sector Este de Pampa Lina.

Unidad de roca meteorizada y fracturada

La unidad de roca fracturada y meteorizada consiste en roca volcánica e intrusiva y está bien expuesta en varios sectores aislados del área del proyecto. Es la principal unidad de permeabilidad en el área de las instalaciones mineras abarcando íntegramente toda el área de estudio.

Esta unidad en sus primeros metros se encuentra meteorizada y parcialmente fracturada. El espesor de esta unidad dentro del área mina varía entre 8 y 175 metros con un espesor promedio de aproximadamente 150 metros. Hacia el sector de Pampa Lina, la unidad disminuye su espesor desde 40 m hasta alcanzar 5 m de espesor. De acuerdo a los resultados de los ensayos de Packer, se estima que en promedio a 150 m de profundidad se produce el contacto entre la roca fracturada y meteorizada, y la roca fresca.

Unidad de basamento

Si bien no forma parte de una unidad hidrogeológica de importancia, se debe señalar que a una profundidad aproximada de 150 m se encuentra la roca intacta y poco fracturada, con una alta calidad de la roca, según el criterio de RQD. Esta se extiende por todo el área del proyecto.

En la Figura 13, la forma de los puntos indica el tipo de litología y los colores indican la ubicación en el área del proyecto de los sondajes perforados, esto último del modo en que se describe a continuación: el color azul corresponde al depósito de relaves; el rojo a las pilas de lixiviación; el verde a la piscina de flotación y el morado al rajo Catabela. De esta distribución, se observa que la permeabilidad disminuye con la profundidad y que las menores permeabilidades se observan en la zona del futuro rajo Catabela.

4.3 Características Hidrológicas

La cuenca carece de cauces superficiales permanentes. En todo el área los cauces corresponden a cursos menores los cuales la mayor parte del tiempo se encuentran secos.

En el mismo estudio se menciona que durante los meses de invierno boliviano se generarían cauces temporales producto de la precipitación que ocurre en los sectores de mayor altura en la cuenca. Parte de la escorrentía superficial se infiltra rápidamente en los sedimentos aluviales, debido a la granulometría predominante del área, siendo la principal fuente de recarga.

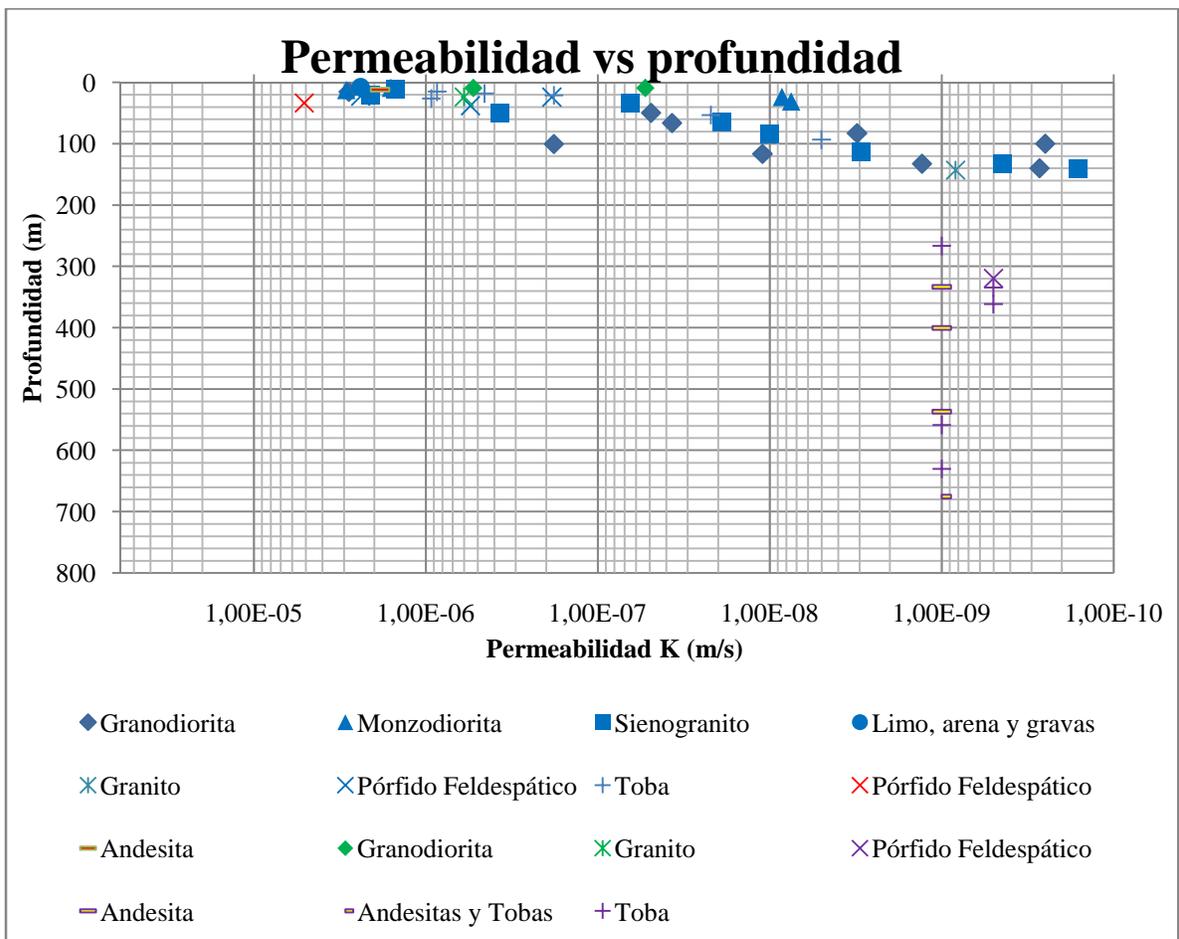


Figura 13. Permeabilidad en zona de estudio. Colores indican el sector al cual corresponden los valores de permeabilidad (ver explicación en el texto).

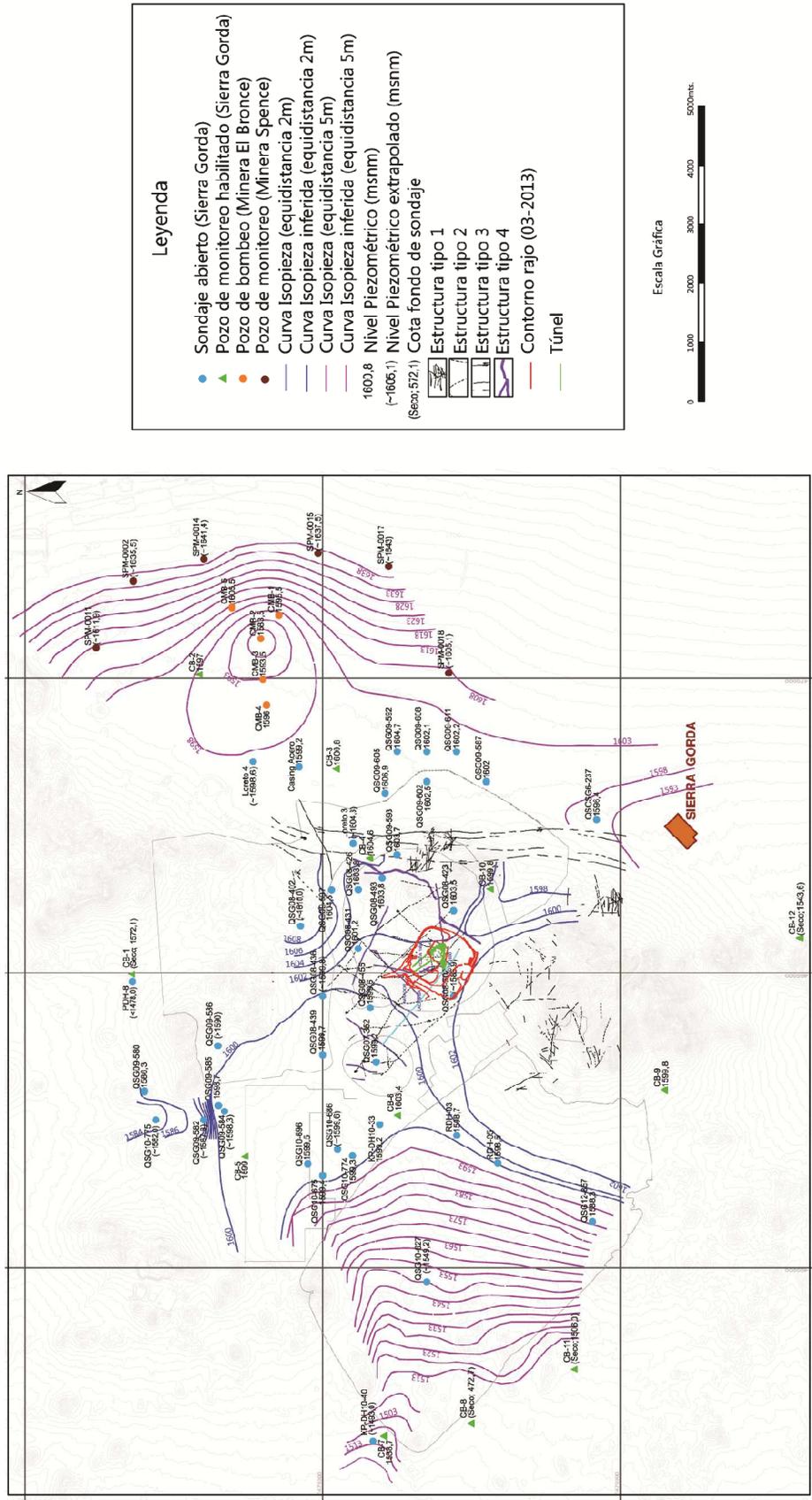


Figura 14. Curvas de nivel agua subterránea. Modificado de actualización hidrogeológica, VAIGS, 2014.

4.3.1 Recarga

La recarga al sistema acuífero de la cuenca Sierra Gorda sucede principalmente durante los meses estivales, producto de la precipitación que ocurre en los sectores de mayor altura en la cuenca. De acuerdo a los registros las precipitaciones medias anuales son escasas y sólo a partir de la cota 2.000 m.s.n.m. son más significativas, alcanzando valores sobre los 70 mm al año. Parte de las precipitaciones que se produce en las altas cumbres se infiltra rápidamente en los sedimentos aluviales generando la recarga de este sistema.

Todos los antecedentes indican que la principal fuente de recarga al acuífero es la que ingresa por la Quebrada Los Arrieros en el extremo oriental de la cuenca.

Actualmente, la empresa VAIGS ha estimado el rango probable de recarga al acuífero a partir de la determinación de la precipitación media en la cuenca y de porcentajes de infiltración, que se mueven en un rango de 1% a 5% de la precipitación anual sobre la cuenca.

En la Tabla 1 se presentan la recarga a la cuenca Sierra Gorda y cuenca aportante al proyecto.

Tabla 1. Tasas de recarga estimadas.

Cuenca	Área (km^2)	Precipitación Media anual (l/s)	Recarga mínima (l/s) (1% de Pp)	Recarga mínima (l/s) (5% de Pp)	Recarga media (l/s) (10% de Pp)
Sierra Gorda	2.408	1.636	16,4	81,8	163,6
Aportante al proyecto	354	88,6	0,9	4,4	8,9

Finalmente, considerando un porcentaje del 5% se ha obtenido una recarga total al acuífero de Sierra Gorda de 81,8 l/s. Parte de este caudal ingresa al área del proyecto y otra parte seguiría en dirección suroeste. Considerando solo el área aportante al área del proyecto la recarga a este sector alcanzaría los 4,4 l/s (VAIGS, 2014).

Se debe señalar que en el informe anterior (SWS, 2010) el valor de recarga estimado fue de 106,1 l/s. La diferencia al valor estimado en el presente estudio se debe a la disminución del área de la cuenca considerada para la estimación de recarga.

Sin embargo, cabe destacar que ambos valores presentados para la cuenca Sierra Gorda se encuentran dentro del rango de recarga al acuífero presentado por la DGA en su informe técnico "Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero de Sierra Gorda" realizado en el año 2012. En este informe se estimó un valor de recarga de 125 l/s.

4.3.2 Almacenamiento

En el área del proyecto, el agua subterránea se ubica entre 28 y 109 metros bajo superficie (mbs), circulando principalmente en la unidad de roca meteorizada y fracturada descrita con anterioridad, la que se encuentra total a parcialmente saturada. Hacia el Este de la zona de estudio, en Pampa Lina, el almacenamiento de agua se produce en la unidad de depósitos aluviales. La matriz porosa en las rocas intrusivas volcánicas e ígneas es pequeña, por tanto el almacenamiento como el movimiento del agua se realiza en las fracturas existentes.

4.3.3 Descarga

La descarga de aguas subterráneas se realiza mediante la explotación de pozos de bombeo con derechos de agua otorgado así como de un caudal subterráneo saliente del sistema estudiado, en el sector Oeste del proyecto.

Aguas arriba del rajo Catabela, según datos de la DGA (ver Tabla 2), se contabilizan derechos de agua constituidos por un total de 40,3 l/s mientras que aguas abajo, los derechos otorgados suman 1 l/s. En la actualidad, no todos los pozos con derechos vigentes se bombean sumado a que se desconoce la cantidad anual de bombeo.

Tabla 2. Derechos de agua constituidos. Fuente: DGA.

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Caudal (l/s)	Código
SOCIEDAD QUIMICA Y MINERA DE CHILE S.A.	468.282	7.476.199	1,5	SQM-1
SOCIEDAD QUIMICA Y MINERA DE CHILE S.A.	467.194	7.474.488	4,9	SQM-3
SOCIEDAD QUIMICA Y MINERA DE CHILE S.A.	468.589	7.476.169	4,6	SQM-4
COMPAÑÍA MINERA EL BRONCE	471.081	7.475.819	6	CMB-1
COMPAÑÍA MINERA EL BRONCE	470.689	7.476.103	4	CMB-2
COMPAÑÍA MINERA EL BRONCE	469.975	7.476.005	7	CMB-3
COMPAÑÍA MINERA EL BRONCE	469.540	7.475.944	4,5	CMB-4
COMPAÑÍA MINERA EL BRONCE	471.200	7.476.524	1,6	CMB-5
COMPAÑÍA MINERA EL BRONCE	469.089	7.475.912	4	CMB-6
COMPAÑÍA MINERA EL BRONCE	469.136	7.476.171	2,2	CMB-7
TRANSPORTES ANTOFAGASTA LIMITADA	465.640	7.466.540	0,4	TA-1
TRANSPORTES ANTOFAGASTA LIMITADA	465.465	7.466.230	0,3	TA-2
ANDREA BEATRIZ	465.465	7.466.230	0,3	AB-1
TOTAL			41,3	

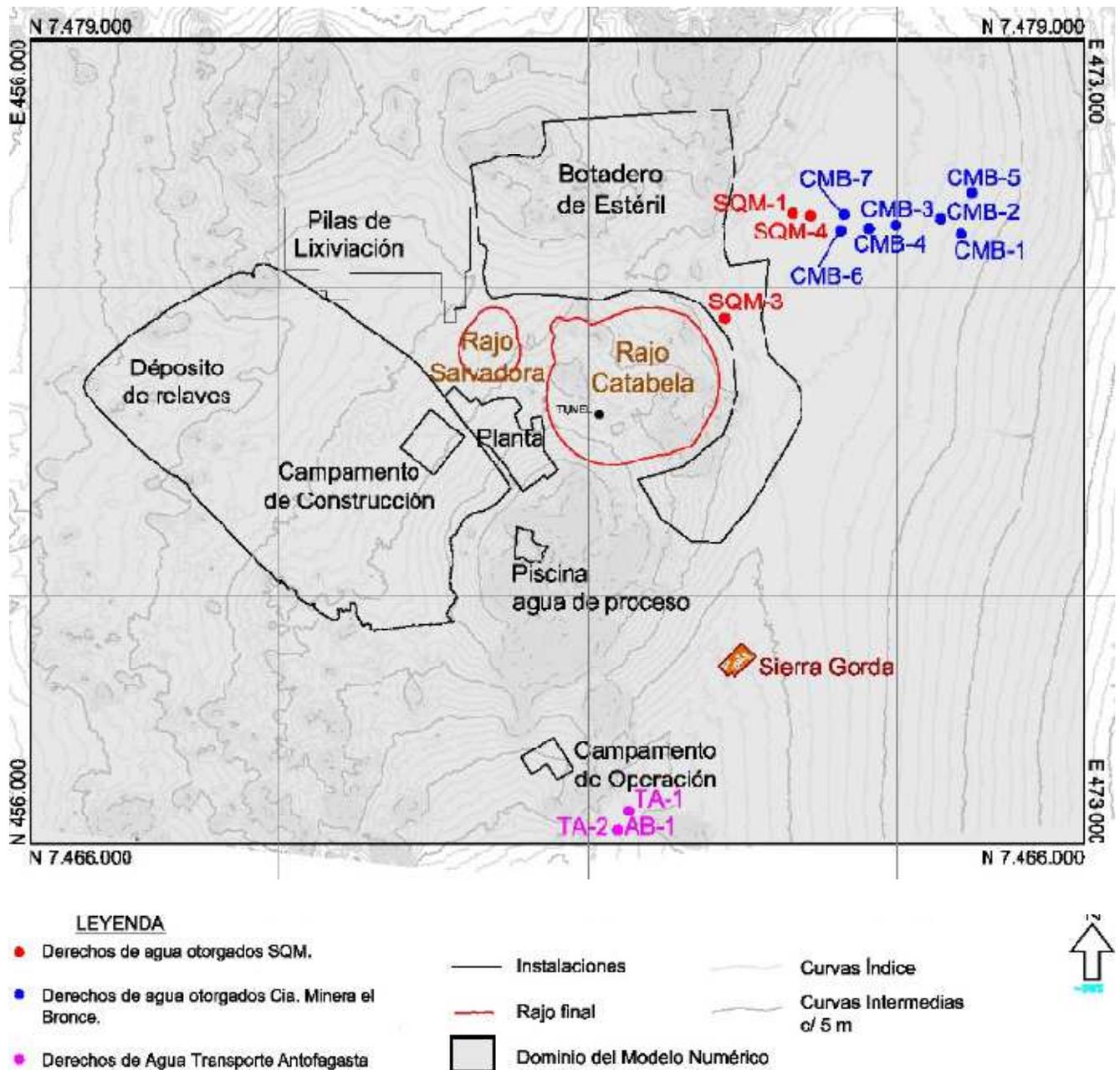


Figura 15. Pozos con derechos de aguas concedidas. Fuente: DGA.

4.3.4 Hidroquímica

En el estudio de impacto ambiental (SWS, 2010), el cual comprende el análisis de los resultados hidroquímicos de 6 pozos monitoreados desde Julio de 2008 hasta Agosto de 2010, con un total de 63 muestras de aguas subterráneas, las caracteriza como aguas del tipo cloruradas y sulfatadas sódicas. Se observan evoluciones en la línea de flujo entre pozos de monitoreo, donde en particu-

lar se distingue un incremento en las concentraciones de Mg y Ca en la medida que el agua atraviesa la zona mineralizada delimitada por el rajo Catabela.

5. Metodología de muestreo y procedimientos analíticos

La obtención de muestras de aguas subterráneas se realiza desde julio de 2008, utilizando dos mecanismos: un dispositivo "bailer" y bomba de agua sumergible. Dependiendo de las características del pozo de monitoreo se utilizan tales dispositivos, siendo empleada la bomba sumergible en pozos con buena transmisividad y recarga de agua, ya que se requiere un columna de agua por sobre la bomba para su correcto funcionamiento. Esto es evaluado tras pruebas de airlift así como del aporte de agua desde el acuífero, durante la perforación. Se colecta de manera manual la muestra, a través de un "bailer", en aquellos puntos que presentan un nivel freático a gran profundidad o consisten en aguas con alta cantidad de finos, los cuales pueden dañar la bomba.

El proceso de muestreo fue realizado por la empresa Water Management Consultants (WMC) entre 2008 y 2010, para luego ser dirigido por Schlumberger Water Services (SWS) hasta 2013, fecha desde la cual VAI Groundwater Services realiza el estudio de aguas subterráneas del proyecto Sierra Gorda. El personal técnico de terreno, que realiza el muestreo, se ha mantenido desde 2011.

5.1 Muestreo de aguas subterráneas

El muestreo se realiza mediante una bomba sumergible Grundfos MP1 o un dispositivo bailer. Los instrumentos se sumergen 5 a 10 metros bajo el nivel freático y se realiza una purga, hasta que se estabilizan los parámetros fisicoquímicos medidos.

Metodología de muestreo

En el lugar de muestreo, se miden parámetros fisicoquímicos con el instrumento portátil multiparametro HI 9828, de Hanna. El equipo cuenta con tres sensores, destinados a medir oxígeno disuelto, conductividad eléctrica (CE), pH y ORP, temperatura y TDS. Tales parámetros se observan durante el proceso de purga, el cual culmina una vez que los valores medidos se estabilizan, llevándose registro de todo el proceso en la planilla de datos de terreno. Una vez que los parámetros fisicoquímicos alcanzan esta condición, se toma la muestra de agua subterránea.

Una vez que se estabilizan los parámetros fisicoquímicos, se procede a tomar 4 muestras de agua desde el recipiente que contiene el volumen más reciente de agua recolectada. Desde allí se extrae agua utilizando una jeringa, la cual se ambienta con esa misma agua, para luego llenar 4 envases que se envían a laboratorio. Tales frascos se ambientan tres veces previo a la recolección de la muestra.

También se realiza una valoración de la alcalinidad al final del día de terreno, en un ambiente controlado. Esto se efectúa llenando un frasco para muestras con un volumen representativo del agua subterránea de cada punto, para analizarla con un kit de titulación Hach, con el cual se añade ácido sulfúrico a la muestra. Este proceso se lleva a cabo hasta que se observa un cambio de color en la muestra, interpretándose posteriormente la alcalinidad del agua en función de los mg/l de ácido añadido.

En dos botellas de polietileno de 30 ml se colectan las muestras preservadas con 1 mg/l de HNO₃: la muestra que se utilizará para determinar la concentración de metales disueltos, se hace pasar por un filtro de 0,45 μ m, mientras que la otra botella se llena con agua sin filtrar, para determinar metales totales. Se utiliza otra botella con las mismas características, para coleccionar aguas filtradas (0,45 μ m) sin uso de HNO₃ como preservante, con el objetivo de analizar la concentración de aniones disueltos en el agua. Una cuarta botella de 500 ml, se utiliza para muestrear aguas para analizar TDS y TSS en el laboratorio.

Tras la toma de cada muestra, los instrumentos utilizados se lavan con agua desmineralizada, evitando la contaminación de la siguiente muestra.

Las muestras se almacenan en frío, de manera vertical para minimizar la posibilidad de contaminación cruzada y derrames, siendo refrigeradas para su preservación. Tras cada campaña de terreno, se envían las muestras al laboratorio, tardando desde el muestreo hasta que llegan al laboratorio entre 7 y 10 días.

5.2 Procedimientos analíticos de laboratorio

La base de datos, que incluye resultados de muestreo desde agosto de 2008 hasta noviembre 2013, fue construida con información proveniente de distintos laboratorios. Se analizaron las muestras en tres laboratorios, en los siguientes periodos: ALS entre julio y octubre 2008; Hidro-

Lab analizó las muestras entre noviembre 2008 y marzo 2009, y ACTLABS analizó las muestras desde abril 2009 hasta la fecha. Se cambio de laboratorio en los periodos descritos, debido a que los datos entregados presentaban equilibrios iónicos superiores al 10% sumado a límites de detección deficientes.

Actualmente, las muestras son enviadas al laboratorio Activation Laboratories Ltda. (ACTLABS), en Ontario, Canadá. Las muestras previamente acidificadas en terreno, son analizadas por los equipos Perkin Elmer Sciex ELAN 9000 ICP/MS, Perkin Elmer Nexion, Thermo icapQ o Agilent 7700. Al inicio y final de cada ronda de análisis, para un grupo de 32 muestras, se analiza un blanco y dos muestras estándar de agua. También se controla la calidad del proceso analítico con el examen de un blanco reactivo (reagent blank) al inicio de la ronda y luego de cada 10 muestras, en el grupo, como duplicado. Considera el análisis de 60 elementos. Adicionalmente, se analiza el Hg por el método de vapor frio FIMS así como el uso de ICP/OES para las muestras que presentan valores sobre el límite de detección del equipo ICP/MS.

Las muestras que no fueron preservadas con ácido en terreno, son analizadas usando el cromatógrafo iónico DIONEX DX-120, el cual determina y cuantifica un grupo de siete aniones. Como las concentraciones de Cl y SO₄, presentes en la zona de estudio, sobrepasan el límite del equipo (75 mg/l y 375 mg/l respectivamente), son diluidas para evitar sobre saturación. La calidad de la información se controla con el uso de duplicados y verificación de la precisión-calibración del instrumento a través de soluciones estándar.

Adicionalmente se analiza el contenido de sólidos totales disueltos (TDS), utilizando un método basado en la conductancia, y sólidos totales suspendidos (TSS), con un método gravimétrico.

Desde 2012, no se analizan las concentraciones de Au, I, Os, Pd, Pt, Re y Ru, las cuales registraban concentraciones usualmente bajo el límite de detección.

En Anexo 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5, se presenta información del límite de detección del equipo ICP-MS, ICP-OES, IC DIONEX DX-120, Método gravimétrico y de conductancia, y técnica Cold Vapour FIMS, utilizados por ACTLABS en el procesamiento de muestras.

6. Características de puntos de muestreo

6.1 Selección y ubicación de puntos de muestreo

La red inicial de puntos de monitoreo de calidad química de las aguas subterráneas está formada por las 16 estaciones, presentadas en el proceso de revisión del estudio de impacto ambiental del Proyecto Sierra Gorda que incluía registros desde julio de 2008. Consisten en sondajes verticales abiertos, habilitados con un tubo de PVC en los primeros metros desde superficie. De estos, tres estaciones aún se encuentran operativas, los demás fueron destruidos o colapsados, por el avance del rajo. (SG-493, SG-237 y SG-402).

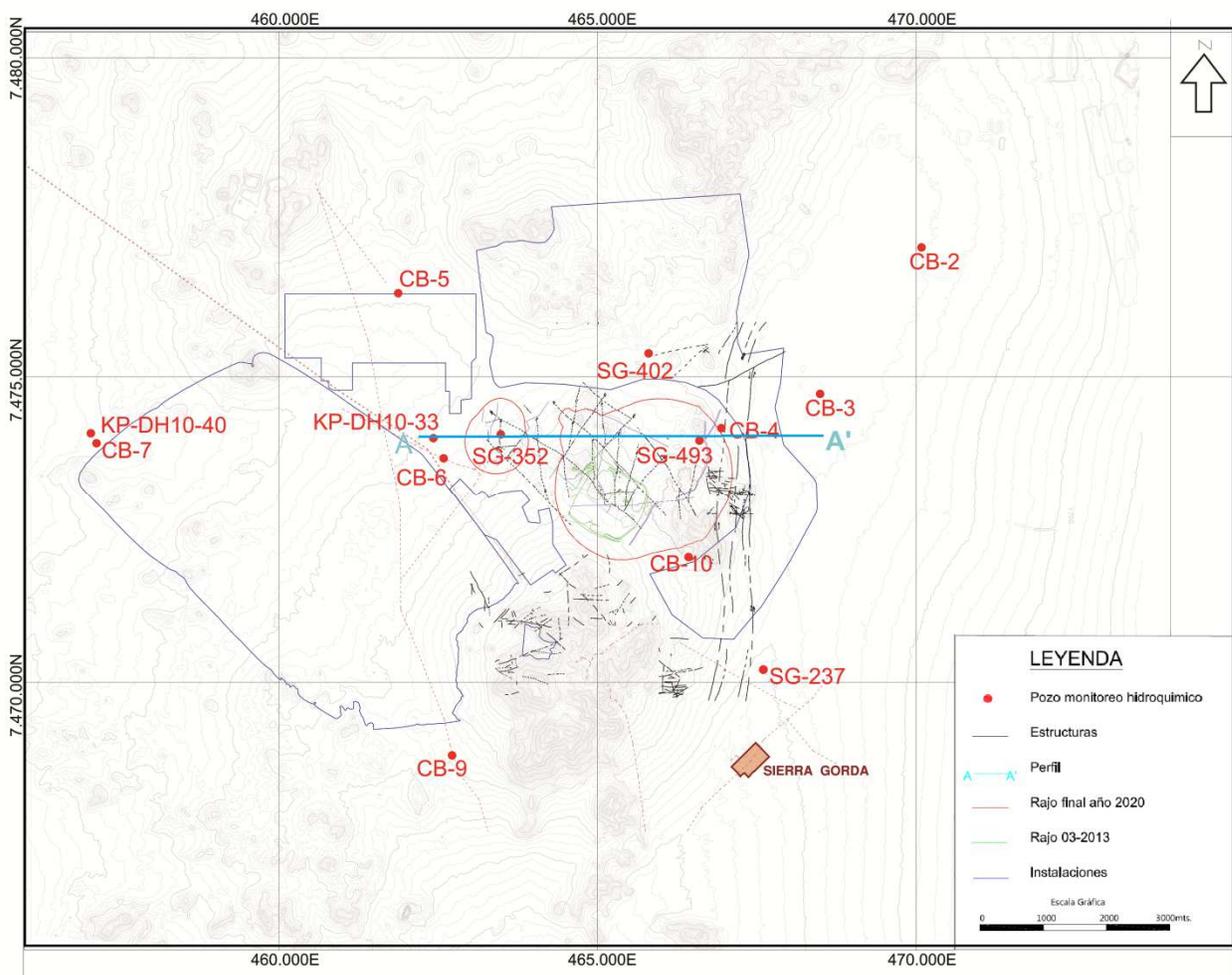


Figura 16. Mapa de pozos de monitoreo y perfil A-A'.

En el proceso de revisión del estudio de impacto ambiental del proyecto, se estableció una nueva red de monitoreo con 12 pozos del tipo "Casagrande" (ver Figura 16) de los cuales dos fueron incorporados a la red en febrero de 2011.

Los pozos de monitoreo restantes fueron perforados e instalados durante los últimos meses de 2012. Cabe destacar, que 4 pozos de los 12 recientemente habilitados, identificados como CB-1, CB-8, CB-11 y CB-12 se encuentran secos a la fecha, catorce meses después de la instalación de los pozos.

La secuencia de habilitación de los pozos consideró la instalación de una tubería de PVC, cuya sección ranurada es del tipo Slot 40 (aperturas de 1 mm), seguida por la instalación de un empaque de grava y luego un sello compuesto por bentonita y cemento.

Una vez terminada la habilitación, se realizó una limpieza de los pozos, sin embargo, por la ausencia de aporte de agua subterránea en la mayoría de los pozos, ésta limpieza se pudo realizar solamente en los pozos CB-4 y CB-10.

La red de monitoreo de la calidad de agua hasta noviembre de 2013, se constituye por 11 puntos de control:

- 8 pozos de monitoreo establecidos en la Resolución Calificación Ambiental (RCA), identificados como CB.
- 3 estaciones de monitoreo pertenecientes a la red de monitoreo inicial (pozos históricos).

En la Tabla 3 se muestra la ubicación y un resumen de registros de cada estación. El monitoreo efectuado en estos pozos incluye mediciones realizadas en terreno y toma de muestras para análisis en laboratorio. En Anexo 1, se muestra una figura con el esquema de construcción de los pozos tipo Casagrande así como una tabla, con información del nivel desde el cual comienza la sección ranurada.

Tabla 3. Resumen pozos de monitoreo.

Pozo	UTM PASAD56		Cota	z (m)	Modo	Periodo de Registro		No. m.	Estado
	Este	Norte				Primera	Ultima		
QSCSG6-237	467.602	7.470.396	1.624,00	60	Bailer	jul-08	nov-13	23	Operativo
QSG08-493	466.600	7.474.000	1.659,00	170	Bomba	jul-08	nov-13	24	Operativo
QSG08-402	465.800	7.475.371	1.649,00	300	Bomba	jul-08	nov-13	24	Operativo
QSG07-352	463.480	7.474.100	1.667,00	190	Bomba	jun-08	may-13	22	Destruído
QSG07-389	465.354	7.473.209	1.687,00	246	Bomba	jun-08	feb-12	15	Destruído
QSG08-502	464.600	7.472.800	1.698,00	250	Bomba	jul-08	oct-12	8	Colapsado
KP-DH10-33	462.423	7.474.041	1.653,7	200	Bomba	feb-11	nov-12	8	No se mide
KP-DH10-40	457.048	7.474.154	1.596,0	150	Bomba	feb-11	nov-12	8	No se mide
CB-1**	465.000	7.478.169	1.677,13	105	-	-	-	0	Seco
CB-2**	470.083	7.477.035	1.629,06	50	Bailer	feb-13	nov-13	4	Operativo
CB-3**	468.490	7.474.732	1.628,08	52	Bailer	feb-13	nov-13	4	Operativo
CB-4**	466.946	7.474.197	1.645,23	350	Bomba	nov-12	nov-13	4	Operativo
CB-5*	461.881	7.476.299	1.656,34	80	Bailer	feb-11	nov-13	13	Operativo
CB-6*	462.587	7.473.723	1.660,09	308	Bomba	feb-13	nov-13	4	Operativo
CB-7*	457.137	7.473.960	1.600,80	125	Bomba	feb-13	nov-13	4	Operativo
CB-8**	457.327	7.472.509	1.607,75	135	-	-	-	0	Seco
CB-9*	463.014	7.469.242	1.678,64	182	Bomba	feb-11	nov-13	13	Operativo
CB-10**	462.714	7.469.049	1.678,64	183	Bomba	nov-12	nov-13	5	Operativo
CB-11**	458.277	7.470.748	1.631,02	125	-	-	-	0	Seco
CB-12**	465.486	7.467.014	1.593,61	50	-	-	-	0	Seco

(*) CB-5 y CB-9 Corresponden a los pozos incorporados a la red de monitoreo en Febrero de 2011, los otros corresponden a los pozos utilizados para el estudio de impacto ambiental.

(**) Pozos incorporados a la red de monitoreo entre Noviembre de 2012 y Febrero 2013.

6.2 Características geológicas de los puntos de muestreo

De los 14 puntos de observación indicados, se estudia en detalle la evolución química en el perfil A-A', por tanto, los pozos de interés son CB-3, CB-4, SG-493, SG-352, KP-DH10-33, CB-7, KP-DH10-40 y CB-6. Se traza el perfil A-A' considerando el criterio de incluir el mayor número de datos respecto del sentido de flujo.

Tabla 4. Características geológicas de puntos de monitoreo.

Nivel	Punto de muestreo	*M.H	Unidad litológica	Zona de alteración	Zona de mineralización
Nivel Freático (NF)	CB-3	Grava	Sedimentos	Lixiviación fuerte	Óxidos de hierro (limonita, hematita, goethita), yeso, cuarzo-sericita. Clastos parcialmente cementados con yeso y calcita.
	CB-4	Roca	Toba	Propilítica dominada por cloritización, lixiviada.	Óxidos de hierro (limonita, hematita, goethita), yeso rellenando fracturas, cuarzo-sericita.
	SG-493	Roca	Toba	Lixivado	Cuarzo-sericita
	SG-352	Roca	Monzodiorita		Óxidos verdes, lixiviado con Cobre
	KP-DH10-33	Roca	Sienogranito		Limonita, limo, halita
	KP-DH10-40	Roca	Granodiorita		Halita, limonita, calcita, clorita, óxidos de manganeso, mica.
4m bajo el NF	CB-3	Roca	Andesita porfídica	Propilítica	Óxidos de hierro (limonita, hematita, goethita) y óxidos negros. Epidota, clorita. Fracturas con relleno de Qz-Ser y limonita.
120m bajo NF	CB-4	Roca	Toba	Propilítica dominada por cloritización, lixiviada.	Calcopirita en fracturas cerradas, cuarzo-sericita, hematita.
83m bajo NF	SG-493	Roca	Toba	Cuarzo-sericita	Sulfuros primarios (principalmente pirita)
71m bajo NF	SG-352	Roca	Monzodiorita / Brecha de turmalina		Sulfuros primarios, levemente enriquecidos (calcopirita, pirita)
45m bajo NF	KP-DH10-33	Roca	Pórfido feldespático, granodiorita porfídica		Discontinuidades rellenas con limonita, halita, yeso, clorita, cuarzo, mineralización de cobre.
88m bajo NF	KP-DH10-33	Roca	Pórfido feldespático, granodiorita porfídica,.	Brecha turmalina	Halita, limonita, limo, clorita, óxidos de manganeso, pirita, calcita

*M.H. corresponde al medio hospedante

Todos estos pozos, corresponden a sondajes realizados con la técnica de aire reverso, por lo que la información geológica levantada a partir de las muestras trituradas de roca obtenidas, no es de detalle .

Predomina información de alteración, sin mayor especificación acerca de las fases minerales observadas. Estos pozos también pertenecen a la red de monitoreo del nivel freático, por lo que se cuenta con información mensual de la elevación de este nivel. En la Tabla 4 se resumen las características geológicas cuya información proviene del mapeo de los sondajes de aire reverso. Se detalla la geología que está en contacto con las aguas subterráneas, indicando a la profundidad en que se intercepta una nueva zona de litología, alteración o mineralización respecto del nivel freático.

Se debe tener en cuenta que la toma de muestra, tanto en los pozos muestreados con bomba sumergible así como con bailer, se realiza algunos metros bajo el nivel freático, tomando una sola muestra por punto. Por lo tanto, no se cuenta con datos a distintas profundidades como para discutir la existencia de una zonación química en el eje vertical.

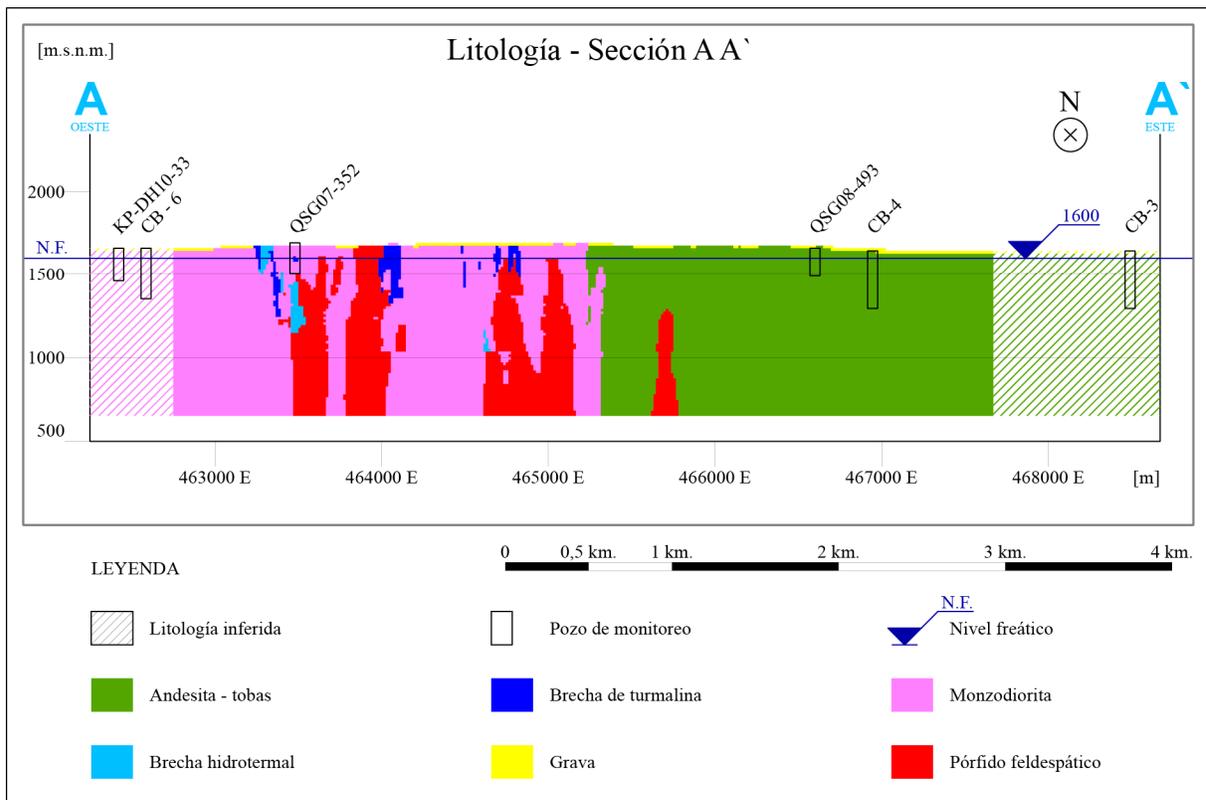


Figura 17. Sección A-A', perfil de Litología. Modificado de perfil inédito de SGSCM, 2013.

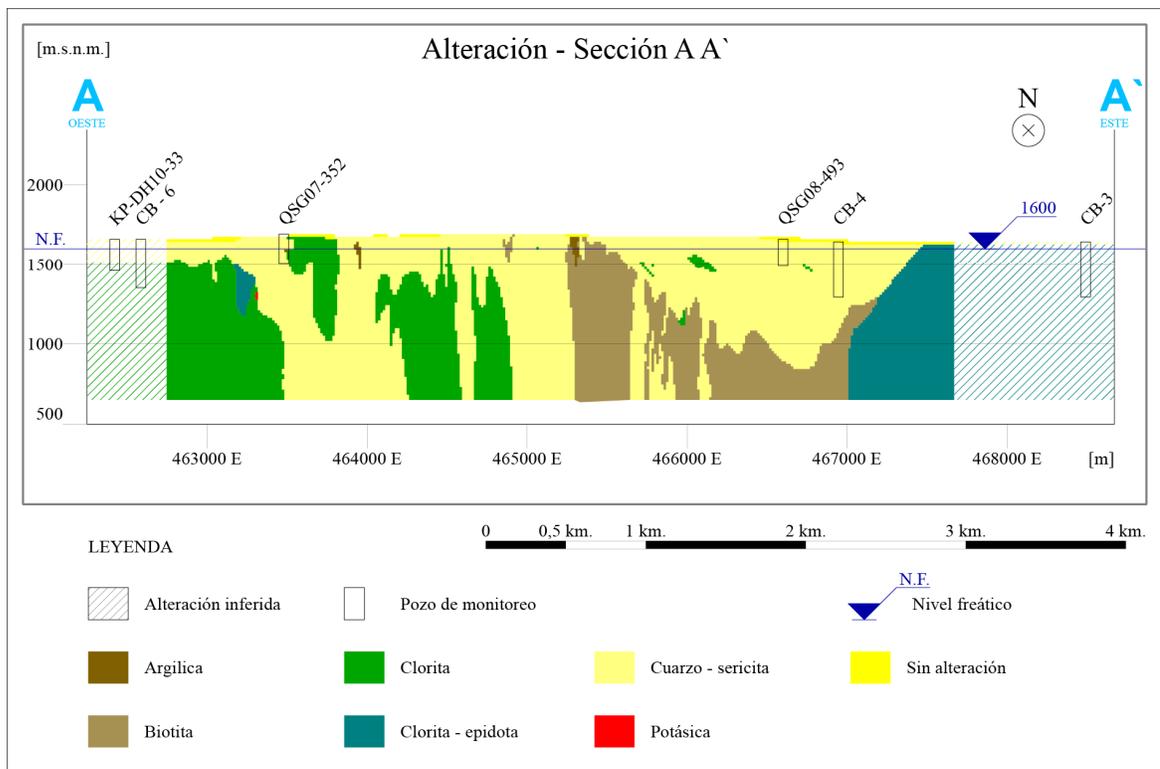


Figura 18. Sección A-A', perfil de alteración. Modificado de perfil inédito de SGSCM, 2013.

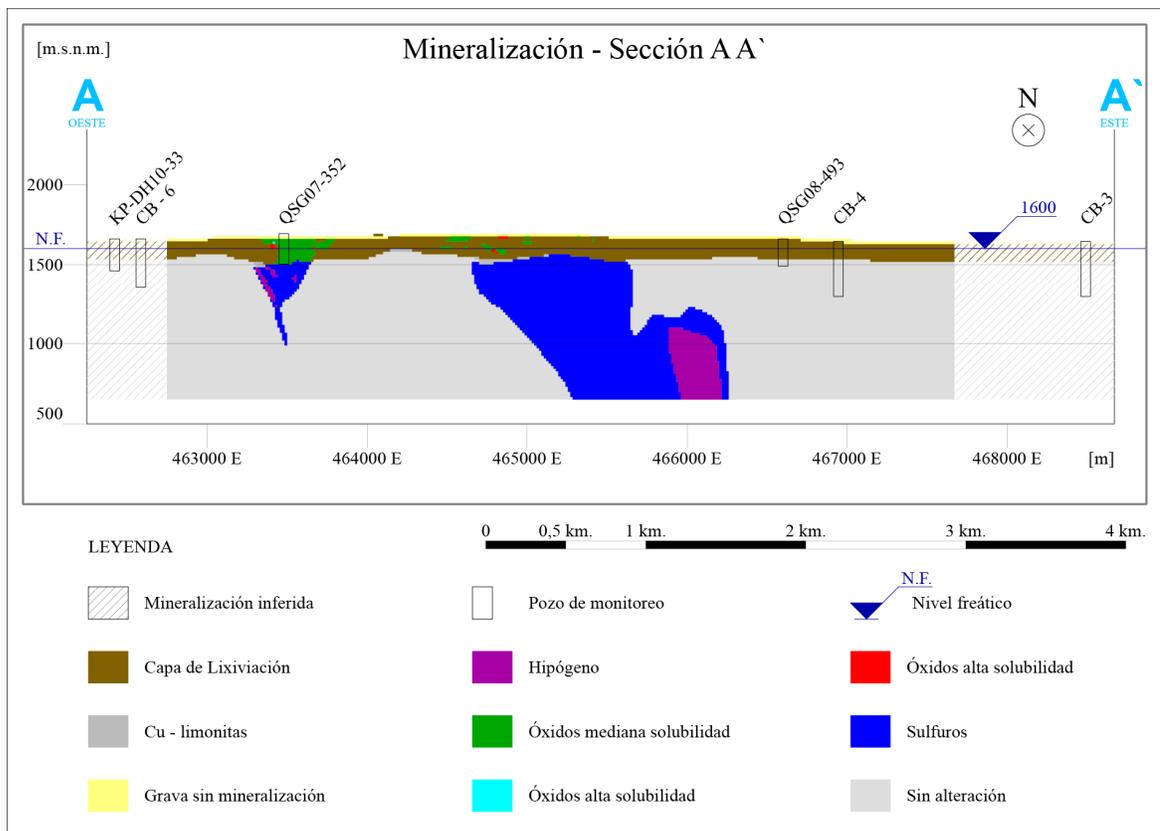


Figura 19. Sección A-A', perfil de mineralización. Modificado de perfil inédito de SGSCM, 2013.

Las características geológicas, en cuanto a litología, alteración y mineralización presentes en profundidad, en la traza del perfil A-A', se resumen en la Figura 17, Figura 18 y Figura 19 respectivamente. Allí también se proyectan los pozos estudiados. La información proporcionada por la compañía minera SGSCM desde su modelo geológico 3D, no incluye datos en profundidad de los pozos CB-3, CB-6 y KP-DH10-33, ubicados fuera del límite informado en el perfil, por lo que se infiere que las características conocidas se prolongan lateralmente. Se complementa esta información con los datos del mapeo de sondajes de aire reverso (ver Tabla 4). Referencialmente, se dibuja el nivel freático a una cota de 1600 m.s.n.m., en circunstancias que el nivel varía entre 1600,86 m.s.n.m. en CB-3 (noviembre 2013) hasta 1599,27 m.s.n.m. en KP-DH10-33 (febrero 2014).

7. Control de calidad

Se lleva a cabo un estudio de control de calidad, para detectar la presencia de posibles errores que resten validez a los datos obtenidos tras el muestreo en terreno y el procesamiento analítico en el laboratorio. El programa de control de calidad consiste en:

- Tomar un duplicado en terreno, durante la campaña de monitoreo (cada 10 muestras).
- Tomar una muestra en blanco, durante la campaña de monitoreo (cada 10 muestras).
- Introducir una muestra en blanco preparada en el laboratorio, al inicio del proceso analítico, junto con soluciones de composición conocida (estándar).
- Realizar un duplicado en laboratorio, cada 10 muestras analizadas.

La comparación de los datos obtenidos para una muestra original y su duplicado de laboratorio, permiten estimar la precisión de la metodología analítica del laboratorio, estimando la dispersión de los datos con el cálculo del rango normalizado. También se controla la reproducibilidad de los datos, comparando los resultados de una muestra original con su duplicado de terreno, lo cual se realiza en cada campaña de monitoreo. Este control se efectúa a través del cálculo de las diferencias relativas absolutas (DRA), entre las muestras y sus duplicados de terreno (ver anexo 3.1 y 3.2). Esta comparación se realiza mediante la siguiente fórmula (Stanley and Lawie, 2007):

$$DRA = 2 \frac{|x_1 - x_2|}{(x_1 + x_2)}$$

Donde x_1 y x_2 corresponden a la muestra original y su duplicado. Si las diferencias relativas absolutas entre las muestras y sus duplicados, para cada elemento, son inferiores al 30%, se considera que el procedimiento de laboratorio tiene una buena precisión analítica.

El control de blancos reactivos de análisis, se utiliza para detectar errores sistemáticos en los procedimientos del laboratorio así como el ruido de fondo en los equipos, mientras que el blanco de terreno permite identificar procesos de contaminación durante la campaña de muestreo.

También se incluye como medida de control de calidad de los datos, el cálculo del balance iónico donde se consideran los elementos mayores.

Se evalúa el porcentaje de resultados de muestras filtradas sobre el límite de detección, para cada uno de los 72 elementos estudiados. 42 elementos (Ag, As, Au, Be, Bi, Br, Cr, Er, Eu, F, Ga, Hf,

Hg, Ho, I, In, Lu, Mo, Nb, NO₂, Os, P, Pd, PO₄, Pt, Re, Ru, Sb, Sc, Sm, Sn, Ta, Tb, Te, Th, Tl, Tm, V, W, Yb y Zr) presentan más del 20% de sus resultados bajo el límite de detección (ver tabla en anexo 3.3) por lo que los resultados disponibles para estos elementos son marginados de los análisis estadísticos así como de tendencias. Resultados para muestras sin filtrar, se presenta en anexo 3.4.

A continuación se presenta un análisis del control de calidad de los datos químicos de las muestras filtradas colectadas en el periodo febrero 2011 - noviembre 2013.

7.1 Geoquímica de 60 elementos

7.1.1 Control de calidad analítico

El laboratorio ACTLABS reporta datos de muestras originales y sus duplicados cada 10 muestras, así como el análisis de un blanco junto con dos soluciones conocidas (estándar) al inicio de cada grupo de 32 muestras. Por lo tanto, la precisión de sus equipos es evaluada con el análisis de la reproducibilidad de la muestra original y su duplicado mientras que la exactitud de los datos entregados, se evalúa con el uso de estándares.

Los valores obtenidos tras el cálculo de diferencias relativas absolutas (DRA) para muestras filtradas y su duplicado de terreno así como analítico (este último, escogido aleatoriamente en el laboratorio), se presentan promediadas en Anexo 3.1 y Anexo 3.2. De la Tabla 5, se observa que en general, los duplicados analíticos presentan DRA bajas, donde en tan solo cuatro elementos se supera el máximo error permitido, logrando una buena precisión en los resultados, con la mayoría de los elementos presentando menos del 10% de diferencias respecto a su duplicado analítico.

7.1.2 Control de calidad de terreno

El control de calidad de terreno tiene por objetivo medir la reproducibilidad del método de muestreo de aguas en terreno y lograr una evaluación del error porcentual relativo, para cada parámetro.

En cada campaña de monitoreo, se toma un duplicado, sumando 12 duplicados en el periodo aquí estudiado (2011-2013). El objetivo de este ejercicio, es evaluar la reproducibilidad del método de muestreo. Calculando la DRA se observa que el requisito de diferencias bajo el 30% no lo cumplen los siguientes elementos, destacando el Dy por presentar altas DRA tanto en duplicados de terreno como analíticos: Ag, Al, Cd, Ce, Er, Fe, Hf, La, Lu, Nb, Nd, Ni, Pb, Pd, Se, Ta, Th, Ti, Y e Yb. Se debe considerar que los resultados obtenidos fueron calculados sobre la base de datos filtrados, es decir, concentraciones disueltas las cuales presentan una mayor variabilidad respecto de los valores obtenidos de DRA para concentraciones totales (sin filtrar) mientras que los duplicados de terreno, presentan diferencias por sobre la tolerancia aquí establecida para 17 elementos. Este ejercicio también se realiza para los datos sin filtrar, los que presentan diferencias bastante bajas con tan solo 4 elementos con valores por sobre el 30% (ver Anexo 3.1).

Los elementos La, Nd, Pb, Se, Ti, Y presentan diferencias relativas absolutas (DRA) mayores al 30%, para muestras filtradas, tanto en duplicados de terreno como analíticos, en el periodo Febrero 2011- noviembre 2013.

Si bien el aluminio presenta una diferencia relativa con su duplicado de terreno, de 30,98%, no se excluirá de los análisis posteriores así como al Fe, ya que ambos elementos se encuentran altamente controlados por la fase en suspensión, viéndose afectadas las concentraciones reportadas, lo que genera diferencias entre duplicados y originales. Para muestras sin filtrar, las diferencias calculadas para estos elementos, no superan el 27%.

Los elementos con sobre el 80% de los datos sobre el límite de detección, y que presentan las mayores diferencias son: Al, Cd, Fe, Ni y Se. Tales diferencias entre muestras y duplicados se explican ya sea porque las concentraciones de elementos trazas, como Se o Cd, están cerca del límite de detección o porque elementos como Fe y Al están altamente controlados por la fase en suspensión. Esto último es relevante, ya que el análisis de variabilidad en las concentraciones entre duplicado y muestra está hecho sobre la base de los resultados de laboratorio para los elementos disueltos, es decir, las muestras filtradas.

Considerando el criterio del 80% de las concentraciones sobre el límite de detección y una tolerancia del 30% de diferencias relativas entre muestra original y duplicado, los elementos validados tras el control de calidad son: Al, B, Ba, Ca, Cd, Cl, Co, Cs, Cu, Fe, Cd, Ge, K, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, Pr, Rb, Se, Si, Sr, U, Zn.

Tabla 5. Diferencias relativas absolutas para muestras filtradas originales y sus duplicados (febrero 2011 a noviembre 2013). En rojo se destacan DRA>30%.

Elemento	% de muestras filtradas, sobre L.D.	Elementos >80% muestras sobre L.D.	Prom. DRA (dup. terreno) 2011-2013	Prom. DRA (dup. analítico) 2011-2013	Elementos a utilizar
Ag	43,53		59,52	7,71	
Al	50		30,98	12,51	Al
As	60,59		29,33	3,61	
Au	30,59		4,94	12,81	
B	97,06	B	12,27	3,38	B
Ba	85,29	Ba	15,95	2,56	Ba
Be	4,12		20,41	7,41	
Bi	0				
Br	28,82		11,97	2,51	
Ca	98,82	Ca	8,08	4,42	Ca
Cd	82,94	Cd	38,46	6,33	Cd
Ce	74,71		31,56	6,74	
Cl	99,41	Cl	2,11	3,09	Cl
Co	75,29		27,97	8,18	
Cr	21,18		16,1	45,79	
Cs	82,94	Cs	21,55	1,74	Cs
Cu	82,94	Cu	20,19	10,6	Cu
Dy	65,88		53,87	40,63	
Er	63,53		37,39	5,59	
Eu	45,88		19,62	10,14	
F	22,35			1,51	
Fe	45,29		46,84	25,18	Fe
Ga	51,18		28,39	2,88	
Gd	65,88		31,98	3,87	
Ge	74,71		27,72	6,62	
Hf	38,82		37,52	28,71	
Hg	52,94		20,27	8,52	
Ho	54,71		16,77	27,28	
I	30,59		0,32	6,51	
In	5,88			0	
K	95,29	K	5,08	3,62	K
La	72,94		45,62	4,4	
Li	94,71	Li	10,88	4,58	Li
Lu	39,41		20,92	35,45	
Mg	98,82	Mg	5,48	3,4	Mg
Mn	92,35	Mn	6,69	3,09	Mn
Mo	74,71		24,35	8,23	
Na	99,41	Na	5,46	5,73	Na
Nb	24,12		83,8	13,17	
Nd	74,12		42,25	13,58	
Ni	82,35	Ni	35,84	11,65	Ni
NO2	13,53			1,02	
NO3	94,71	NO3	4,99	1,5	NO3
Os	0				
P	1,76			7,98	
Pb	78,24	Pb	13,47	76,19	Pb
Pd	19,41		83,33		
PO4	11,18			3,66	
Pr	60		14,12	2,85	
Pt	0				
Rb	81,76	Rb	17,26	2,23	Rb
Re	33,53		7,07	1,5	
Ru	8,82				
Sb	54,71		31,6	12,52	
Sc	13,53			8,73	
Se	75,88	Se	32,47	6,87	Se
Si	84,12	Si	11,53	3,05	Si
Sm	63,53		47,63	22,04	
Sn	8,24				
SO4	100	SO4	1,97	1,9	SO4
Sr	94,71	Sr	11,21	3,42	Sr
Ta	20,59		33,33	11,92	
Tb	48,82		17,05	6,45	
Te	8,82			12,34	
Th	26,47			82,88	
Ti	75,29	Ti	35,58	7,56	
Tl	71,76		19,47	3,49	
Tm	38,24		20,28	23,97	
U	85,88	U	7,6	4,52	U
V	21,76		18,47	5,57	
W	31,76		8,7	4,04	
Y	79,41	Y	44,19	11,89	
Yb	61,18		43,11	25,81	
Zn	92,35	Zn	11,44	7,73	Zn
Zr	51,18		19,73	17,63	

Los resultados de laboratorio para las muestras en blanco colectadas en terreno exhiben concentraciones que se ubican, en la mayoría de los elementos analizados, por debajo del límite de detección de los equipos de laboratorio. Esto valida los datos ya que es un indicador de que no se está produciendo contaminación durante la toma de muestras en terreno. Los resultados de los análisis de blancos se presentan en anexos 3.5 y 3.6, mostrando valores levemente sobre el límite de detección para el B, Mg, Na, B y Zn.

Se observa que en los meses de agosto 2012 y noviembre 2012, las concentraciones registradas de cloruro y sílice son superiores a los valores esperados para una muestra en blanco, por lo que en tales campañas se detecta un posible problema de contaminación. Sin embargo, considerando los altos valores que suelen tener dichos elementos en las aguas de la zona de estudio, se desestima que una contaminación de tan baja magnitud incida en los posteriores análisis. Se debe notar que en los blancos de laboratorio, no se detectan tales concentraciones, por lo que no corresponde a ruido de fondo del equipo analítico.

7.2 Geoquímica de elementos mayores

Para evaluar el equilibrio iónico se utiliza la expresión dada por:

$$\text{Balance iónico (\% de error)} = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \times 100$$

Donde se consideran las concentraciones de iones mayores, en unidades de meq/l. Las especies incluidas son Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} .

Los equilibrios iónicos (EI) calculados se muestran en la Tabla 6. En el periodo 2011-2013 las muestras fueron analizadas en el laboratorio ACTLABS. De la tabla se observa que tan solo 6 muestras presentan un error iónico sobre el 10%, mostrando en general balances que califican como excelente (entre -2% y 2%) y bueno (entre -5% y 5%). Por lo tanto, la confiabilidad de los datos es adecuada para realizar los posteriores análisis estadísticos y de tendencias. Aquellas muestras que presentan un error iónico sobre 10%, fueron excluidas de los análisis, considerando este valor como el umbral de aceptabilidad.

Tabla 6. Error de balance iónico (%) de muestras de agua subterránea en Sierra Gorda.

Estación	Feb. 2011	May. 2011	Ago. 2011	Nov. 2011	Feb. 2012	May. 2012	Ago. 2012	Nov. 2012	Feb. 2013	May. 2013	Ago. 2013
SGCSG6-237	3,80	4,15	4,69	2,77	3,70	4,42	2,28	5,09	0,97	4,37	6,86
QSG 07-352	7,92	5,52	1,71	-0,40	3,43	5,66	4,00	6,61	0,93	2,75	-
QSG 07-389	2,87	2,18	2,10	-3,35	4,40	-	-	-	-	-	-
QSG 08-402	0,16	-0,76	-1,05	-1,43	0,03	4,38	85,53	0,45	-3,09	-1,47	-0,75
QSG 08-493	8,69	4,04	5,56	2,98	2,89	6,46	1,21	6,64	1,58	1,92	3,17
CB-2	-	-	-	-	-	-	-	-	3,18	4,27	7,43
CB-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-16,01	4,34	6,50
CB-4	-	-	-	-	-	-	-	5,91	3,03	-1,65	11,73
CB-5	3,07	2,63	5,40	2,16	6,24	5,86	3,90	5,95	0,28	4,59	1,10
CB-6	-84,25	-0,41	3,69	3,13	5,95	3,51	4,94	6,65	1,22	2,06	4,25
CB-7	86,96	4,90	0,08	-6,77	4,01	6,03	2,15	-13,23	1,79	3,60	-4,97
CB-9	-4,60	-1,52	-0,43	1,22	-47,50	7,93	2,05	-0,69	-3,44	-2,22	1,50
CB-10	-	-	-	-	-	-	-	5,66	1,28	5,73	6,70

8. Hidrogeoquímica de aguas subterráneas en Sierra Gorda

8.1 Evolución temporal en los datos geoquímicos de los pozos de monitoreo

La mayoría de los pozos de monitoreo de la serie "CB" fueron instalados a fines de 2012, razón por la cual los registros de análisis de calidad de agua abarcan un periodo limitado. Una excepción forman los pozos CB-5 y CB-9 que fueron instalados durante 2011. Para los puntos de muestreo CB-6 y CB-7, se inició el muestreo de calidad de agua previo a la instalación de estos pozos en 2012, en dos sondajes ubicados en puntos cercanos, KP-DH10-33 y KP-DH10-40 respectivamente.

La gran mayoría de estos pozos "CB" se encuentran aún en proceso de estabilización de la química del agua así como de los niveles freáticos. El proceso de estabilización del nivel se refleja en la composición de las aguas, cuyos registros muestran significativas variaciones entre las campañas trimestrales.

En Anexos 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, se resume el comportamiento de los resultados de análisis de calidad de agua de los pozos de monitoreo, desde que se tiene registro de ellos. En general, no se reconocen tendencias cíclicas ni estacionales, exhibiendo los elementos mayores concentraciones estables en el tiempo, en los puntos de monitoreo históricos (con información desde 2008).

Para el caso de los pozos CB-6 y CB-7, la estabilización se evalúa comparando la calidad de agua de estos puntos, que se encuentran en proceso de estabilización de su nivel freático, con los puntos de monitoreo cercanos KP-DH10-40 y KP-DH10-33, las que se encuentran a distancias del orden de 250 m. Considerando que históricamente, se habían mantenido estables las concentraciones en los pozos "KP", se utiliza esta información como referencia puesto que las aguas de los pozos "CB" (6 y 7) presentan composiciones claramente diferentes y con una alta variabilidad, tendente a igualar las concentraciones históricamente registradas en esos sectores, lo cual se observa en los diagramas Durov y Piper, en Anexo 4.7 y Anexo 4.8.

8.2 Parámetros físico-químicos

La información de pH, temperatura, TDS y ORP de los pozos KP-DH10-33 y KP-DH10-40, se encuentran representadas en las curvas de CB-6 y CB-7, respectivamente (datos desde febrero 2011 hasta noviembre 2012).

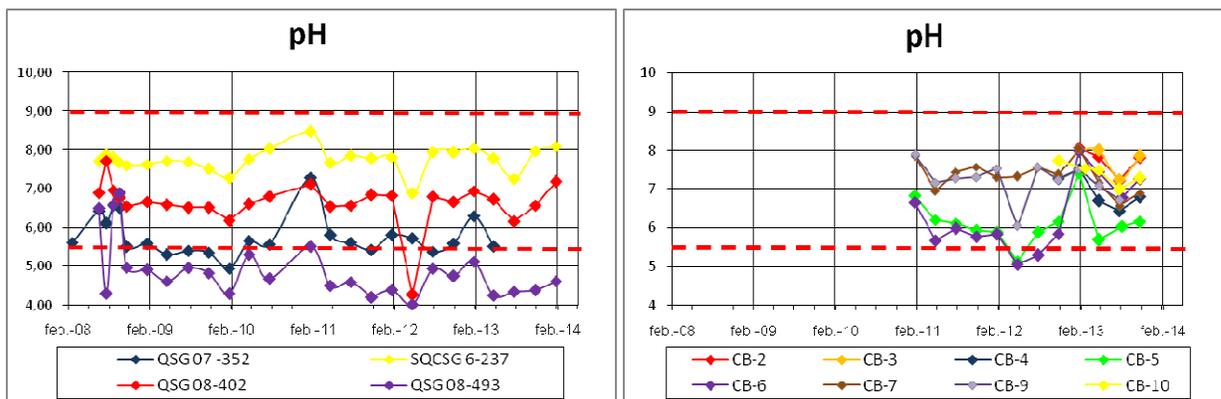


Figura 20. pH de pozos de monitoreo históricos (izq.) y pozos CB (der.). Líneas punteadas indican límites establecidos por la norma de aguas para riego, NCh1333.

En la Figura 20, el valor de pH varía de neutro a ácido. Considerando la distribución espacial de los pozos (ver FIGURA 16), se observa que los valores más ácidos de pH se registran en el pozo QSG08-493 (SG-493), aumentando levemente sus valores aguas abajo del flujo, en QSG07-352 (SG-352), donde el pH se caracteriza por ser ácido. Al Este de los rajes proyectados, en Pampa Lina, se observan pH neutros a alcalinos, lo cual también se mide en el sector sur (CB-10 y CB-9). Destaca el bajo pH de CB-5, ubicado al noroeste de los futuros rajes.

Las temperaturas (ver Figura 21) se mueven entre 18,8°C y 29,51°C, sin presentar un control estacional en cuanto a sus valores.

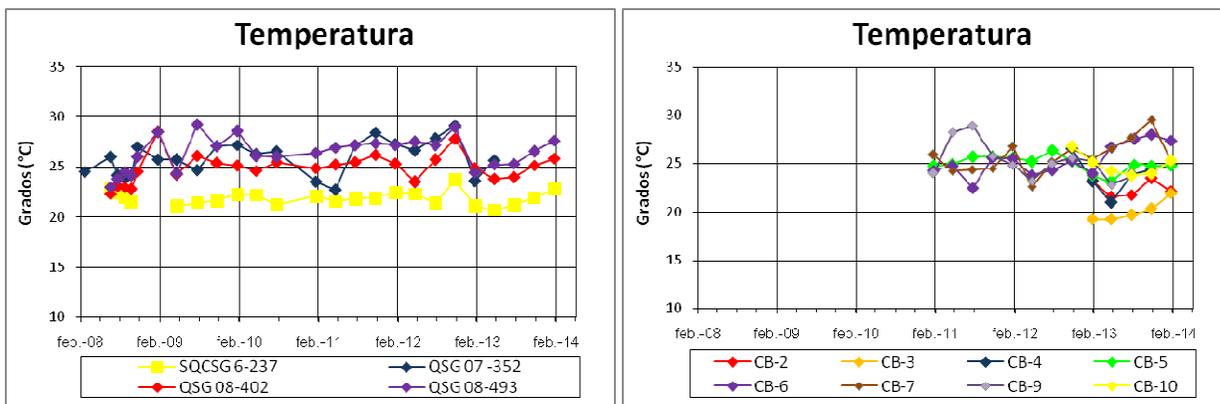


Figura 21. Registro de temperatura, pozos históricos (izq.) y pozos CB (der.).

En aguas subterráneas naturales, dentro del rango de pH entre 7 y 8, un potencial redox entre 400 y 800 mV indica condiciones oxidantes, entre 0 y 400 mV, condiciones parcialmente reductoras, y entre 0 y -400 mV, condiciones reductoras (Planer-Friedrich, 2008).

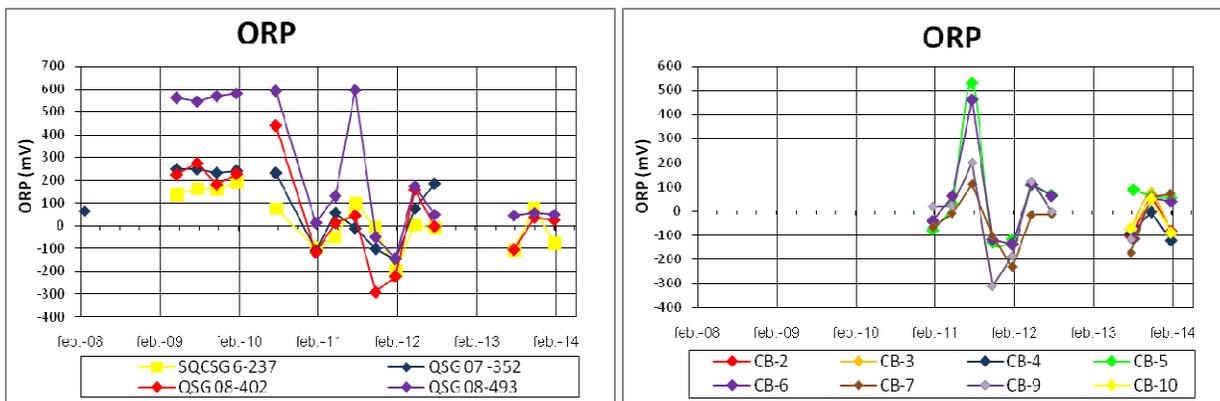


Figura 22. Registro de ORP, pozos históricos (izq.) y pozos CB (der.).

Actualmente no se observan condiciones oxidantes en ninguno de los pozos monitoreados (ver FIGURA 22), registrándose condiciones parcialmente reductoras hasta la fecha que comprende el estudio de este trabajo (noviembre 2013). Nótese que hasta agosto de 2011, se registraron condiciones oxidantes en el pozo QSG08-493. Entre noviembre de 2012 y mayo de 2013, se encuentra la base de datos incompleta para este parámetro.

Diagrama Durov

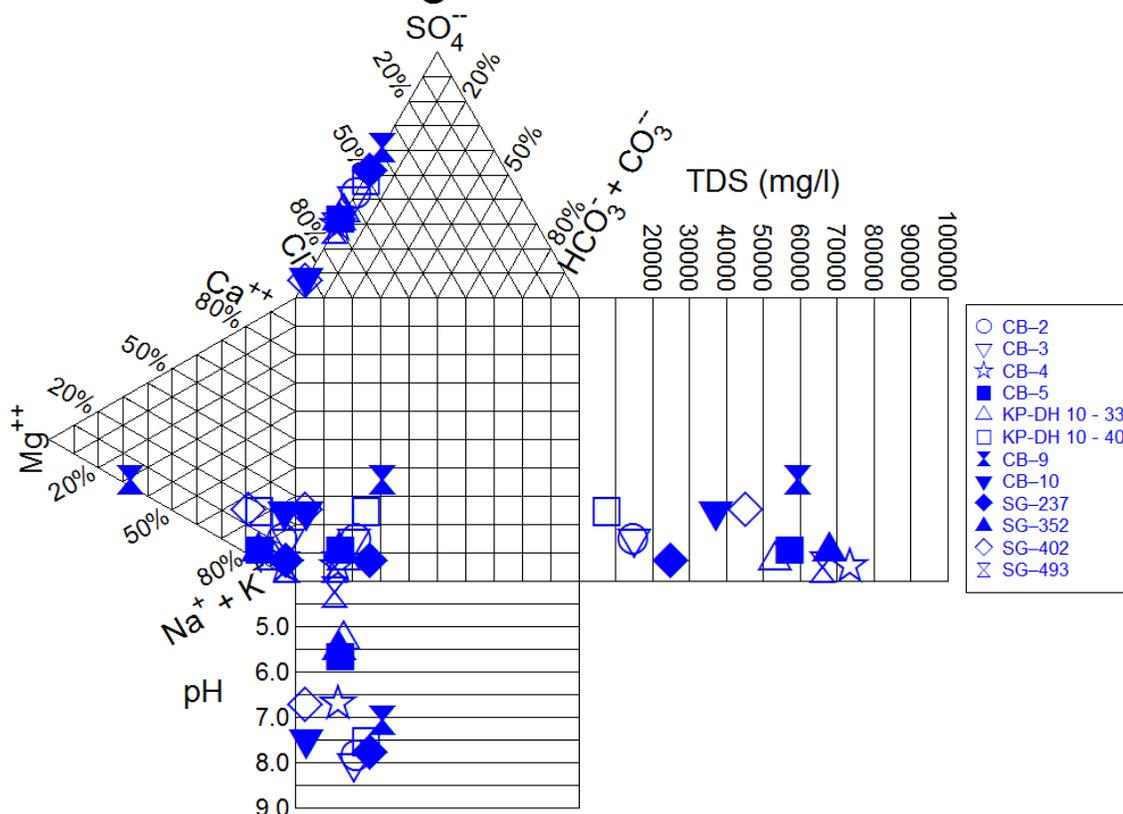


Figura 23. Diagrama Durov, monitoreo agosto 2013 y noviembre 2012 (pozos KP y SG-352).

Graficando estos datos en un diagrama Durov, se observa una alta concentración de sólidos totales disueltos (TDS). Respecto del contenido de TDS, se observan cuatro grupos según sus concentraciones: KP-DH10-40, CB-2 y CB-3, con el menor TDS de la zona; CB-10 y SG-402; CB-9; y finalmente, el resto de los pozos. Se debe notar que esta clasificación agrupa pozos espacialmente cercanos, mostrando un control territorial de las concentraciones de TDS. Las aguas hospedadas en grava (Pampa Lina), presentan un menor contenido de TDS respecto de las aguas donde el nivel freático intercepta las rocas, con excepción del pozo KP-DH10-40 (bajo TDS, agua hospedada en roca).

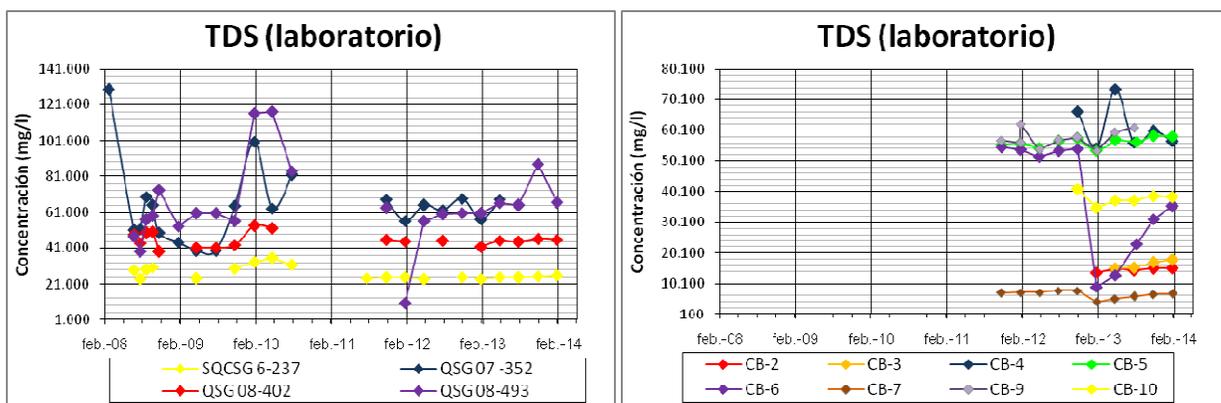


Figura 24. Registro de sólidos totales disueltos (TDS), resultados de laboratorio. Monitoreo de pozos históricos (izq.) y pozos CB (der.).

En la Figura 24, se observa un comportamiento relativamente estable en los valores de TDS. El salto observado en la curva del pozo CB-6, marca el comienzo del monitoreo de este pozo, ya que datos hasta noviembre de 2012, pertenecen al pozo cercano KP-DH10-33. Entre noviembre de 2012 y agosto de 2013, se encuentra la base de datos incompleta para este parámetro.

8.3 Geoquímica de elementos mayores

Constituyentes mayoritarios, son aquellos con concentraciones >5 mg/l (Merkel, 2002). Considerando los promedios de cada elemento en la base de datos, así como su desviación estándar, se identifican como elementos mayores a las siguientes especies: B, Ca, Cl, SO₄, K, Mg, Na y Si.

8.3.1 Clasificación del agua subterránea

Utilizando un diagrama de clasificación Piper, se grafican las concentraciones de iones disueltos mayoritarios monitoreados en agosto de 2013. Para los puntos KP-DH10-33 y KP-DHG10-40 se grafica los datos de Septiembre 2012, la última toma de muestra en estos puntos previo a su reemplazo por CB-7 y CB-6, respectivamente. Se observa como tendencia general, que se puede distinguir dos tipos diferentes de facies hidroquímicas en las aguas subterráneas analizadas (FIGURA 25):

- Aguas cloruradas y sulfatadas sódicas, las cuales se caracterizan por tener como catión principal el Na y como anión principal al Cl y SO₄.
- Aguas sulfatadas magnésicas, correspondiente a las aguas monitoreadas en el pozo CB-9, donde se tiene como catión principal al Mg.

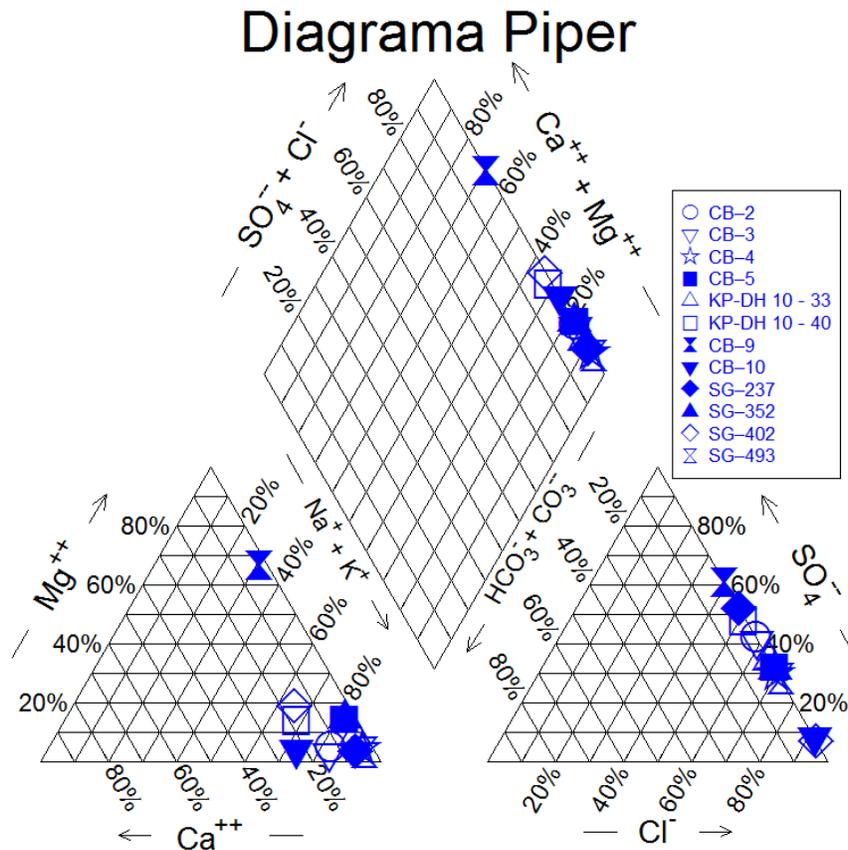


Figura 25. Diagrama Piper, monitoreo agosto 2013

Considerando que el flujo del agua subterránea tiene una dirección E - W, se observa en la figura de distribución espacial de diagramas Stiff (Figura 26) una evolución de las aguas al interactuar con la zona mineralizada (representada por el contorno del futuro rajo) así como la existencia de sectores con un comportamiento hidroquímico distinto.

Tras el paso del flujo de agua subterránea por la zona mineralizada se observa un aumento del contenido de sulfato, cloruro, sodio y potasio (QSG08-493, CB-4). Los puntos QSG08-402 y CB-10 muestran los indicios de interacción agua-roca, indicando que el agua subterránea ha experimentado reacciones que modifican significativamente las concentraciones aniónicas, ganando Ca,

Mg y Cl a la vez que disminuyen cuantiosamente los niveles de sulfatos. Siguiendo la línea de flujo, pasando por la zona mineralizada, se observa que las aguas se enriquecen en magnesio y sulfatos, mientras pierden los iones Na+K y Cl.

En el sector oeste y noroeste de la zona de estudio, se observa un comportamiento similar de los pozos CB-5, CB-6 y SG-352, mientras que aguas abajo de estos puntos (siguiendo la dirección del flujo), el pozo CB-7 muestra una composición química distinta, pobre en sulfatos, cloruros y sodio. Por el contrario, las concentraciones de magnesio y sulfato del pozo CB-9 presentan concentraciones significativamente mayores a los demás puntos de muestreo.

En el sector de Pampa Lina, los pozos CB-2, CB-3 y SG-237 presentan concentraciones de cloruro considerablemente más bajas que el resto de la zona estudiada.

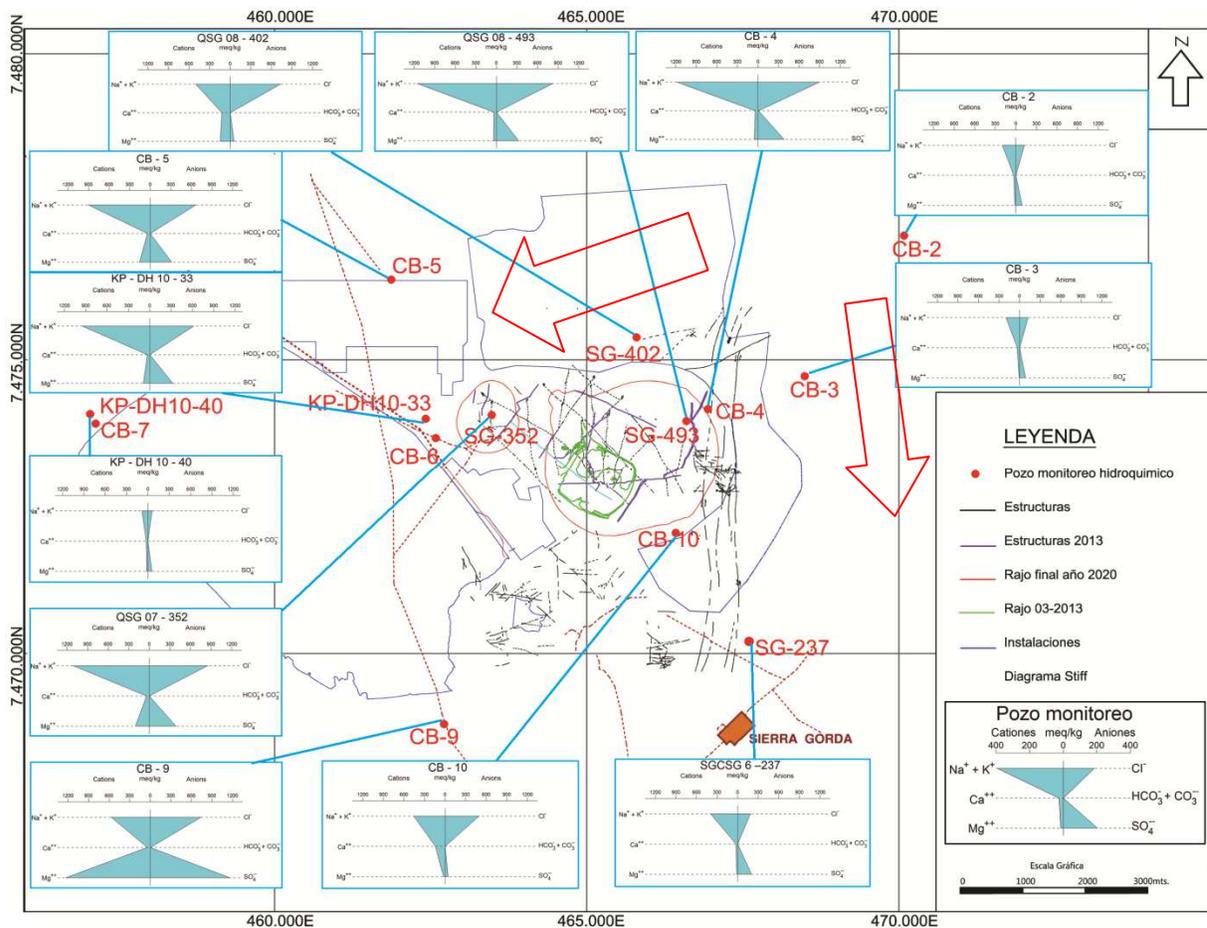


Figura 26. Diagrama de distribución Stiff, monitoreo mayo 2013. Datos de KP-DH10-33 y KP-DH10-40 son de noviembre 2012. Flechas rojas indican dirección de flujo de agua.

8.3.2 Concentraciones relativas de elementos

Considerando la distribución espacial observada en el diagrama Stiff así como en la descripción temporal de los pozos y diagrama Durov, se agrupan los pozos en busca de establecer correlaciones con el ion conservativo cloruro.

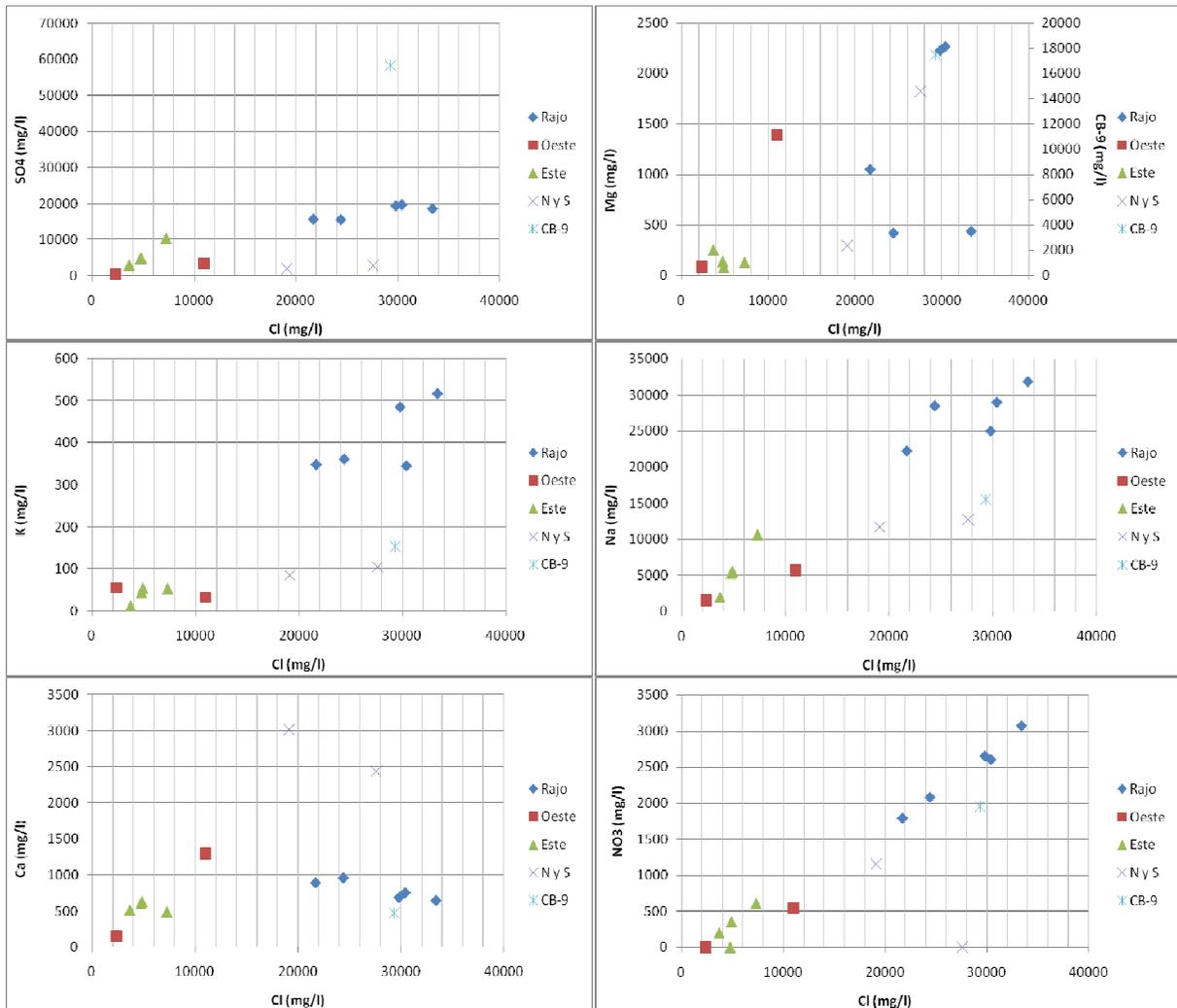


Figura 27. Concentraciones de iones mayores versus ion cloruro, campaña agosto 2013 y noviembre 2012.

En la Figura 27, se agrupan bajo el nombre "Rajo" los datos de agosto 2013 de los pozos CB-5, CB-4 y QSG08-493 así como los datos de noviembre 2012 de los pozos KP-DH10-33 y SG-352 (no se cuenta con datos para agosto de 2013 en estos puntos). El grupo "Oeste" corresponde a los pozos CB-6 y CB-7, campañas de agosto 2013. El grupo "Este" incluye los datos de agosto 2013 de SG-237, CB-2 y CB-3 (pozos en Pampa Lina) así como el monitoreo de noviembre 2012 para

KP-DH10-40. "N y S" corresponde a los pozos CB-10 y SG-402, ubicados al sur y al norte del rajo, respectivamente, para la campaña agosto 2013, misma fecha de la campaña del pozo CB-9 incluida en la Figura 27.

Se observa una correlación de 0,818 entre los parámetros Na y Cl, en el grupo "Rajo" para los pozos KP-DH10-33, SG-352 y QSG08-493, y de 0,58 para todo el grupo (incluidos pozos CB-4 y CB-5). La segunda mejor correlación observada, es en el mismo grupo, para los parámetros SO4 y Cl, con un factor de 0,36. El resto de los grupos no presenta valores de correlación que vinculen las variables.

La dispersión de los datos confirma las agrupaciones aquí definidas, separando los pozos con características similares. Se observa que el pozo CB-7 del grupo Oeste tiene características similares al grupo Este, el cual incluye al pozo KP-DH10-40, especialmente cercano a CB-7.

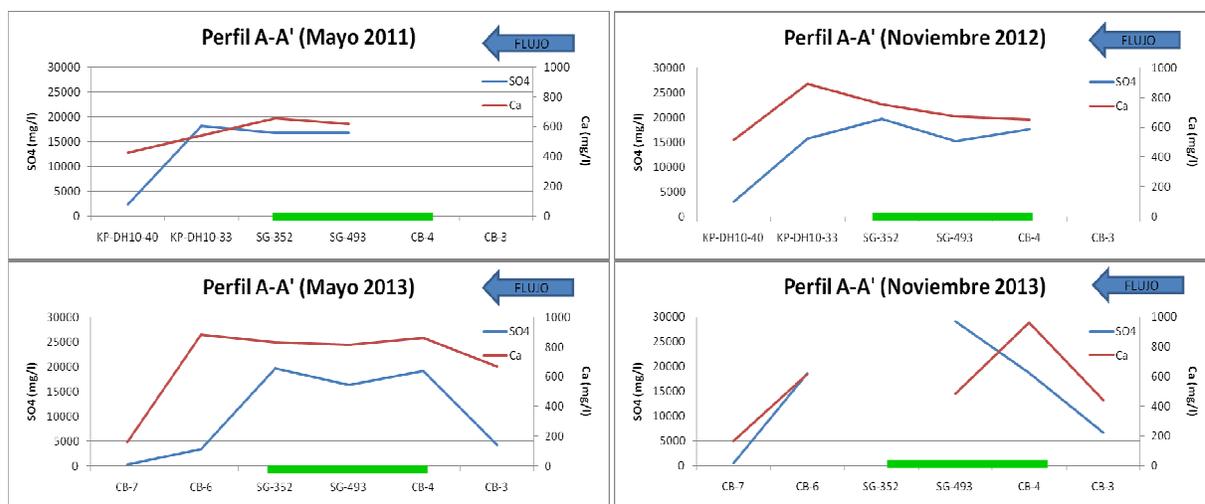


Figura 28. Evolución de la concentración de SO4 y Ca, a lo largo de la línea de flujo. En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvador y Catabela.

En la Figura 28, donde se ordenan los pozos de E a W, se observa que aumenta la concentración de sulfato y calcio en el sentido del flujo de aguas subterráneas, alcanzando sus máximos valores en la zona mineralizada para el caso del sulfato, mientras que el calcio registra sus mayores valores aguas abajo, en un punto muy próximo (KP-DH10-33). Se observa una drástica caída de las concentraciones de sulfato entre noviembre 2012 y mayo 2013 para el pozo CB-6, muy cercano a KP-DH10-33, el cual se recupera en sus valores para el monitoreo de noviembre del mismo año.

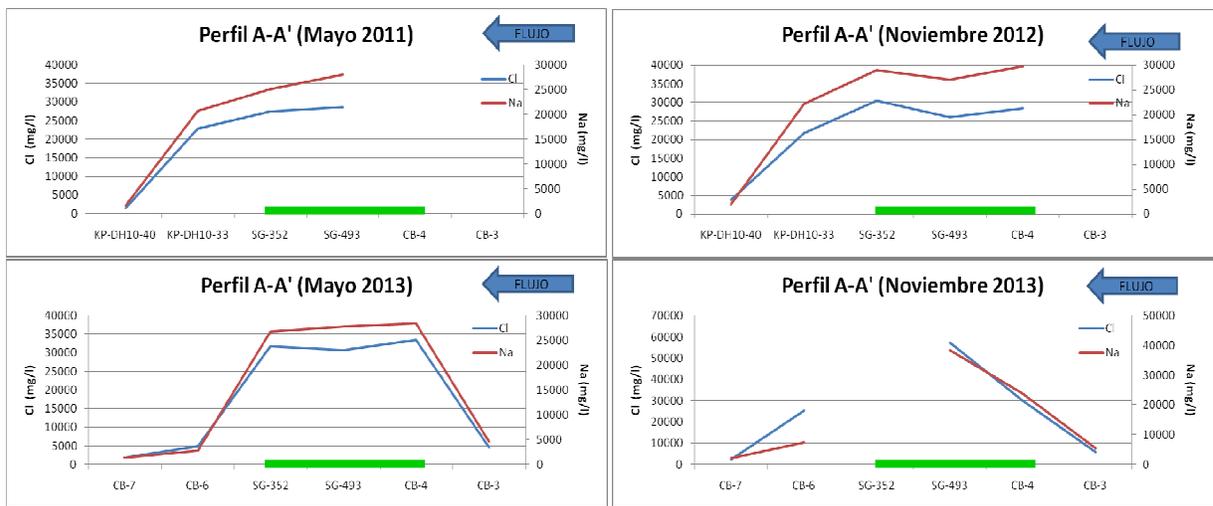


Figura 29. Evolución de concentración de Cl y Na, a lo largo de la línea de flujo. En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvadora y Catabela.

Se observan los máximos valores de sodio en CB-4 y cloruro en SG-352 (ver Figura 29), manteniendo concentraciones altas en la zona mineralizada, para luego disminuir en torno a 8 veces las concentraciones a más de 5km del rajo (KP-DH10-40/CB-7). Nuevamente se observa una drástica caída de las concentraciones, esta vez de cloruro y sodio, entre noviembre 2012 y mayo 2013 para el pozo CB-6, el cual se recupera en sus valores de cloruro para el monitoreo de noviembre del mismo año.

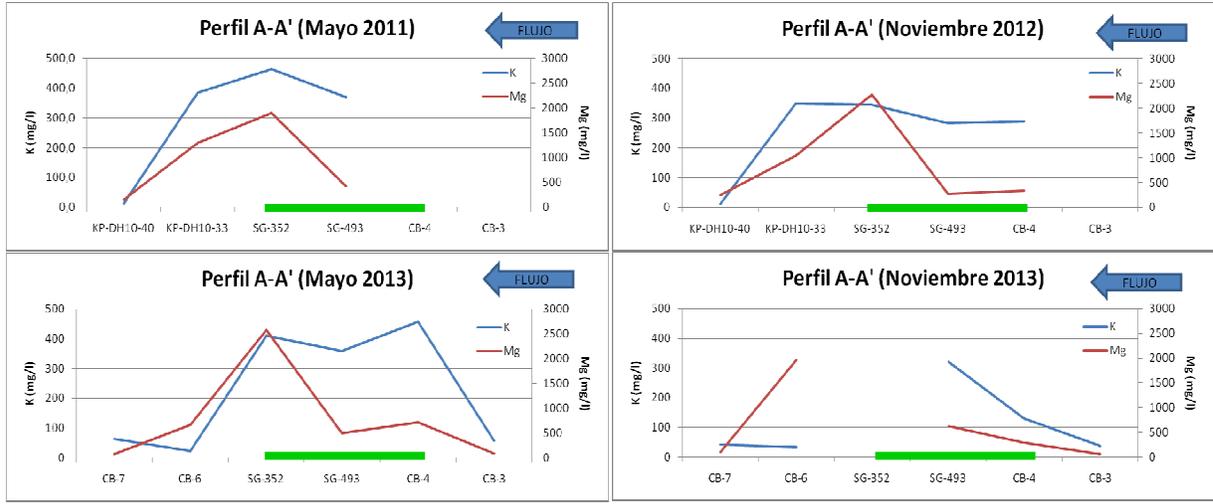


Figura 30. Evolución de concentración de K y Mg, a lo largo de la línea de flujo. En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvadora y Catabela.

En la Figura 30 se observa que el potasio presenta altas concentraciones en el tramo de la zona mineralizada así como en el punto cercano KP-DH10-33. Este elemento disminuye fuertemente sus concentraciones en CB-4, durante el primer año de monitoreo de este pozo, no así el magnesio, que experimenta un leve descenso. Esta baja en las concentraciones también se observa en la transición del monitoreo de los pozos cercanos CB-7 y KP-DH10-33. En general, se observan bajos valores de magnesio en el pozo SG-493, ubicado en el futuro rajo, en rocas con alteración cuarzo-sericita en la zona de lixiviado. El magnesio aumenta considerablemente en SG-352, también dispuesto en la zona mineralizada, en un sector donde está presente la litología de pórfido feldespático (fuertemente alterada a feldespato potásico) predominando la alteración clorítica así como óxidos de mediana solubilidad (ver Figura 17, Figura 18 y Figura 19). El potasio también describe la misma curva entre ambos puntos, pero con diferencias menos marcadas.

8.4 Geoquímica de elementos menores y traza

Se consideran como elementos menores, a aquellos que registran concentraciones menores a 5 mg/l y mayores a 0,1 mg/l, mientras que los elementos trazas son las especies con concentraciones inferiores a 0,1 mg/l (Merkel, 2002). Calculando los promedios de cada elemento en la base de datos, así como su desviación estándar, se identifican como elementos menores a las siguientes especies: Al, Br, Cd, Cu, Fe, I, Li, Mn, Ni, Se, Sr y Zn. Los elementos trazas corresponden a Ag, As, Au, Ba, Be, Bi, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Hg, Mo, Pb, Rb, U, entre otros.

8.4.1 Concentraciones relativas de elementos menores y traza

En la Figura 31, se presentan las concentraciones relativas al cloruro, de elementos mayores, menores y trazas, agrupados por sector (descrito al pie de la Figura 27).

Se registran mayores concentraciones de arsénico, aluminio y estroncio en Pampa Lina. En general, se observa que los pozos del sector Rajo, presentan mayores concentraciones de elementos traza y minoritarios, como Mn, Cu, Mo, Pb, Zn, Li, B. Destacan para el grupo Rajo, puntos con concentraciones superiores al sector, como es el caso de SG-352.

De la Figura 32, se observa un aumento en el contenido de cobre a medida que las aguas interactúan con el yacimiento, alcanzando su máximo registro en el pozo SG-352, donde el nivel freático intercepta el sector mineralizado con cobre de mediana y alta solubilidad. Disminuyen las con-

centraciones en KP-DH10-33 para luego reducirse bruscamente en KP-DH10-40. Boro y litio muestran un comportamiento acoplado a lo largo de la línea de flujo, donde no se observa una influencia significativa del tramo comprendido por la zona mineralizada.

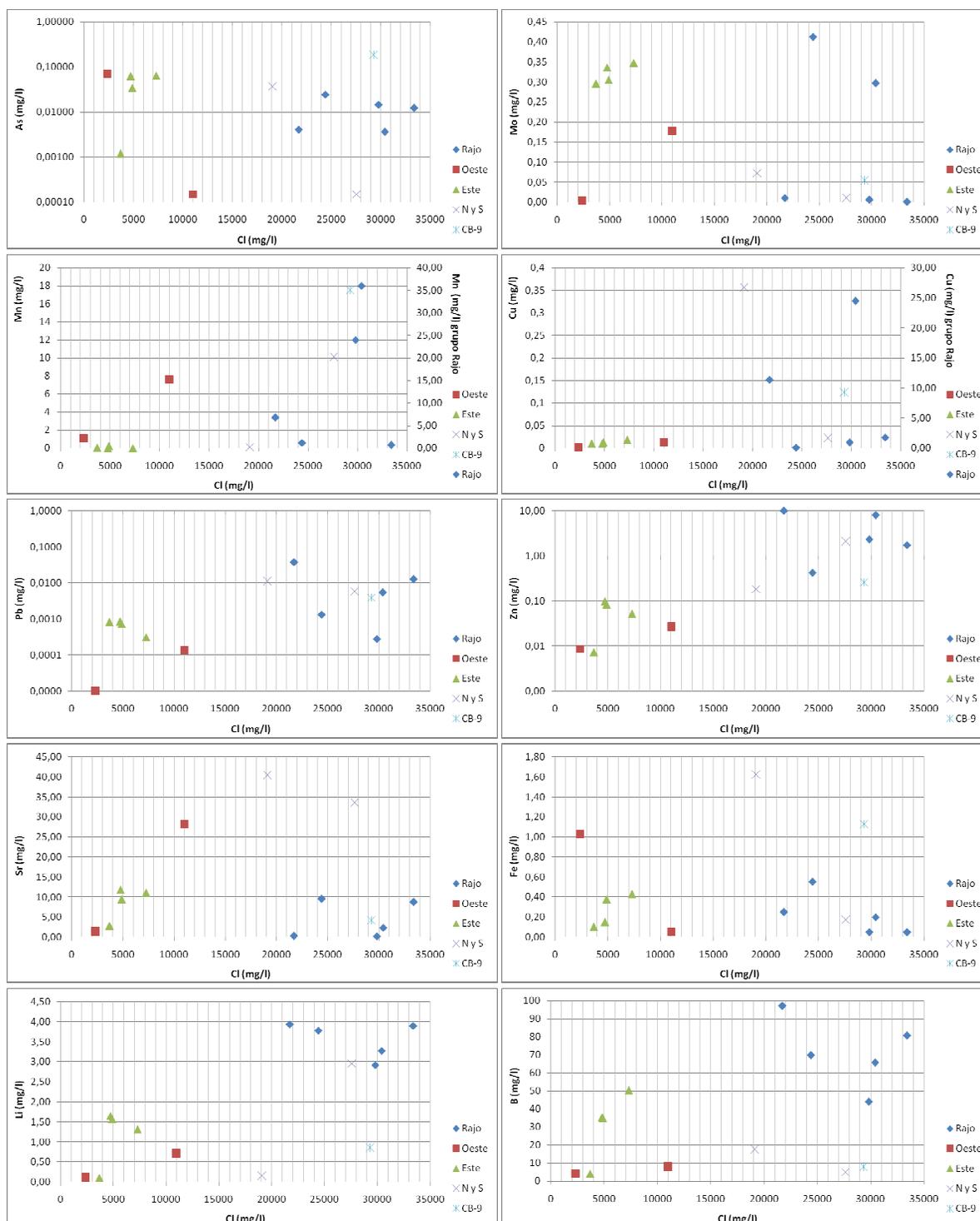


Figura 31. Concentraciones agrupadas de elementos mayores, menores y trazas versus ion cloruro. Campañas de agosto 2013 y noviembre de 2012 (SG-352 y pozos KP).

En la Figura 32, se observa que el manganeso disminuye sus concentraciones en SG-493, para luego alcanzar su mayor valor en la línea de flujo, en SG-352.

Existe una alta variabilidad en la concentración de molibdeno, elemento que no cumple con el criterio de reproducibilidad establecido respecto de los duplicados de terreno.

El Zn y Hg aumentan sostenidamente su concentración a lo largo de la línea de flujo, para luego caer varios órdenes de magnitud en KP-DH10-40. Fe y Al muestran un comportamiento similar a lo largo de la línea de flujo.

El estroncio y el arsénico, muestran un comportamiento tendente a disminuir sus concentraciones a medida que interactúan con el sector mineralizado.

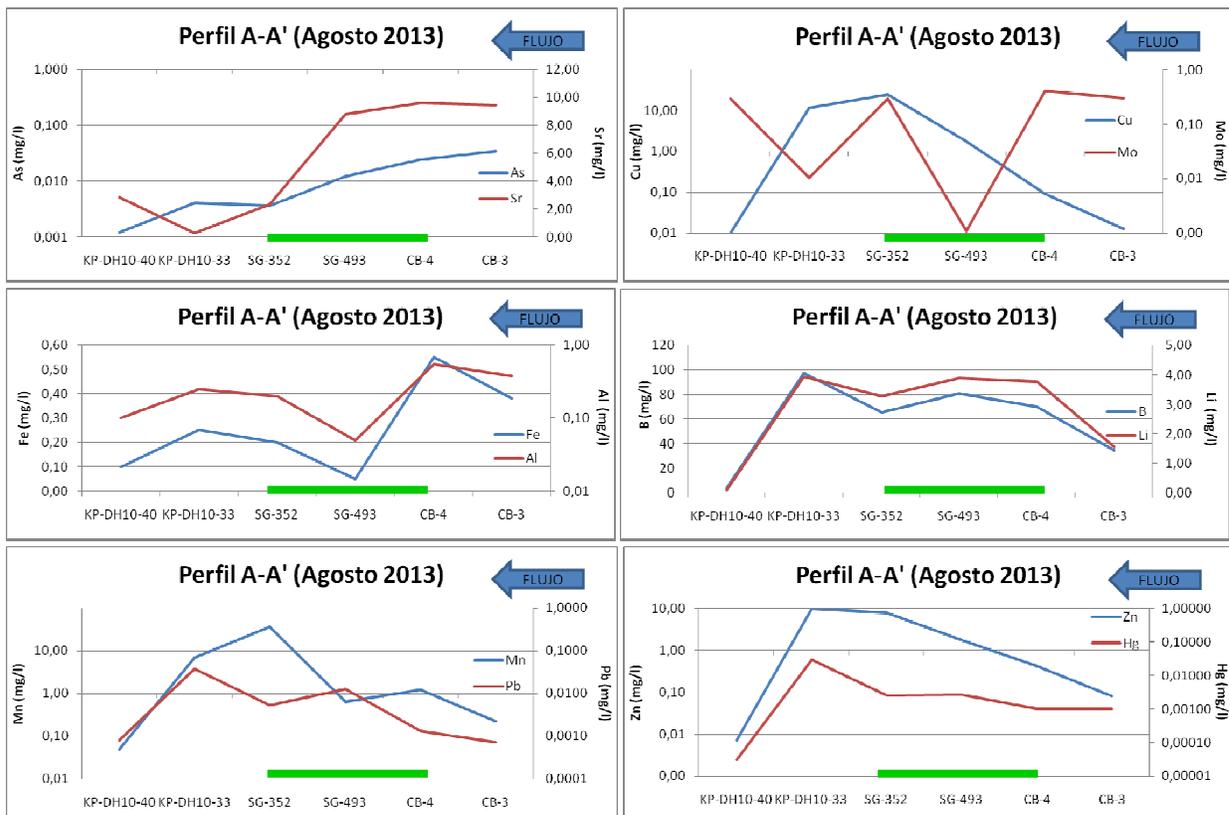


Figura 32. Evolución de elementos mayores, menores y traza a lo largo de la línea de flujo. Campaña agosto 2013 y noviembre 2012 (pozos KP y SG-352). En verde se destacan pozos ubicados en sector rajo Salvador y Catabela.

8.5 Comparación de muestras de aguas filtradas versus no filtradas

Se estudia la relación existente entre concentraciones totales y disueltas para todos los elementos, con el objetivo de identificar la sensibilidad de cada elemento respecto de la fase en suspensión que es retirada en el proceso de filtrado, en el cual se retiene el material de tamaño superior a $0,45\mu\text{m}$.

Se calcula la fracción dada por la concentración de la muestra filtrada dividida por muestra sin filtrar, a lo largo de la base de datos. Se debe notar que en cada campaña de monitoreo se colectaron muestras filtradas y sin filtrar, por lo que se tiene una base de datos robusta para estudiar la relación entre ambas concentraciones. Luego se calcula un promedio de dicha fracción para cada elemento, así como la desviación estándar de ese promedio. Se consideran solo los elementos que muestran una buena calidad de su información, definidos en el capítulo 7.

El tamaño de filtro que se utiliza en el muestreo es el de uso estándar, de $0,45\mu\text{m}$, el cual permite eliminar de la muestra el sedimento suspendido, coloides y agregados de coloides, algas, bacterias, precipitados de óxidos metálicos, limo y arena. Sin embargo, deja pasar coloides de una tamaño inferior, arcillas y complejos orgánicos, fibras orgánicas y precipitados de óxidos metálicos de menor tamaño.

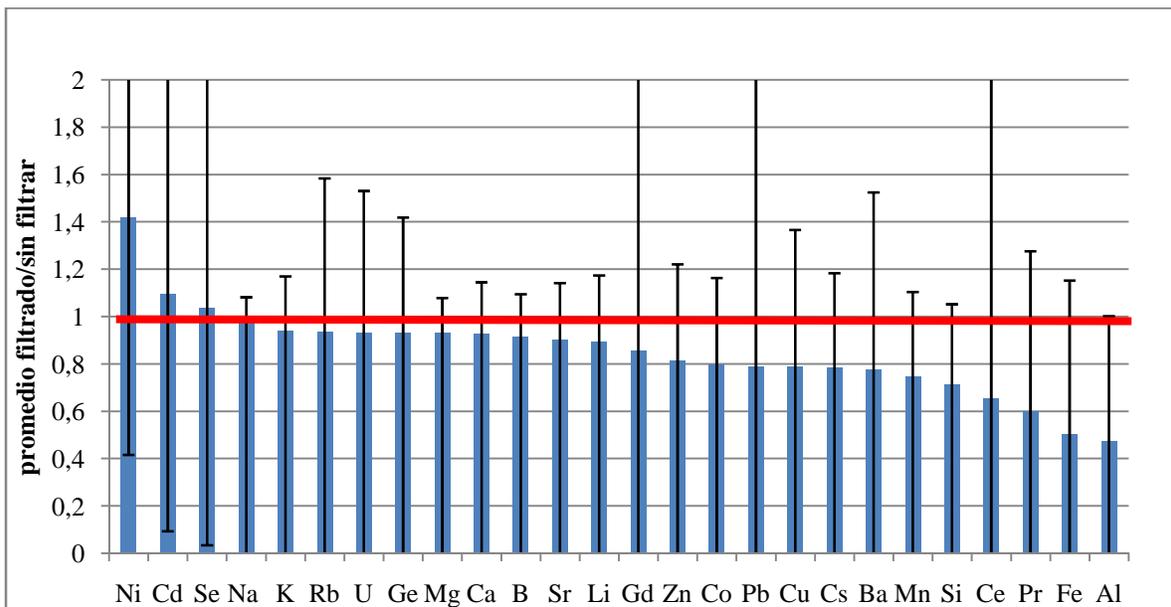


Figura 33. Fracción de muestras filtradas divididas en muestras sin filtrar. Las barras de error corresponden a una vez desviación estándar (1σ).

Los resultados del cálculo del promedio de la razón entre concentraciones disueltas (filtradas) y totales (sin filtrar) se presentan en la Figura 33. Se observan elementos que no presentan variaciones significativas en sus concentraciones dependiendo del tipo de muestreo, con una razón cercana a 1. Es el caso de: Cd, Se, Na, K, Rb, U, Ge, Mg, Ca, B, Sr, Li y Gd, los que se encuentran disueltos en casi su totalidad, destacando la presencia de iones mayores en este grupo, el cual no varía sustancialmente según el tipo de muestreo. El único elemento que promedia una razón sobre 1 es el níquel.

Los elementos restantes, poseen concentraciones en torno o inferior a 0,8, como Zn, Co, Pb, Cu, Cs, Ba, Mn, Si, Ce, Pr, Fe y Al, encontrándose en la fase sólida más que en la disuelta.

9. Análisis estadístico

Se consideran las campañas realizadas desde julio de 2008 hasta agosto 2013 que presentan un balance iónico adecuado (bajo el 10% de error), para el análisis estadístico. Se estudia los elementos que presentaron una buena confiabilidad, tras el control de calidad detallado en el capítulo 7. A valores de un elemento inferior a su límite de detección, se les reasigna un valor equivalente a la mitad del valor del límite de detección respectivo.

9.1 Estadística univariable

Comprende el cálculo de variables estadísticas como el mínimo, máximo, media y desviación estándar para las muestras filtradas, es decir, concentraciones disueltas de los elementos. Estos resultados se presentan en la Tabla 7. El cálculo del promedio, mínima, máxima y mediana para cada pozo de monitoreo, comprendiendo la totalidad de su registro, se presenta en Anexos 5.1 a 5.11.

Se presenta la información de TDS obtenida en laboratorio, ya que los valores registrados en terreno presentan una amplia dispersión con varios órdenes de magnitud de diferencia respecto de las concentraciones reportadas en laboratorio, lo que cuestiona el correcto proceso de toma de datos. Esto último debido a que el instrumento cambia unidades de medida de ppm a ppb, dependiendo de las concentraciones observadas, lo cual puede no haber sido registrado en la base de datos por el personal que realiza la lectura en terreno.

Los iones mayores son los que presentan la menor variabilidad a lo largo del registro. En contraste, el Al, Ba, Cu, Fe, Ni, Pb y U tienen un alto coeficiente de variación en las concentraciones reportadas. Se observa un amplio rango de valores para el Cl, Mg, Na, SO₄ y TDS mientras que el Li presenta una baja desviación estándar, con un rango acotado.

Se debe tener en cuenta, que los datos aquí resumidos en el análisis estadístico, provienen de 13 pozos, donde los puntos de monitoreo más distantes entre sí, se ubican a 14 kilómetros.

También se observa si los datos presentan un control estacional, promediando los resultados de las campañas de cada trimestre, en el periodo agosto 2008 y noviembre 2013. Se presentan los resultados en la Figura 34.

Tabla 7. Estadística básica de base de datos histórica, proyecto Sierra Gorda (2008 - 2013).

Parámetro	N° de datos	Media aritmética	Desviación estándar	Cv%	Mínimo	Máximo	Rango
Alk	176	124,38	175	140,69	1,3	1060	1058,7
pH	189	6,3	1,17	18,7	3,73	8,47	4,74
Cond	188	69,95	28,51	40,76	2,53	147	144,47
Temp	189	24,2	2,29	9,45	18,8	29,51	10,71
DO	117	1,8	2,55	143,31	0	16,02	16,02
Eh	103	111,3	196,7	176,69	-311,2	596,1	907,3
Cl	198	22009	10898	49,51	1480	57400	55920
NO3	196	1412,5	1010,68	71,55	0,15	5250	5249,85
SO4	198	15502,3	12637,14	81,52	40,78	78100	78059,2
TDS	163	48381,7	22793,35	47,11	12,7	117280	117267,3
TSS	169	542,8	2495,64	459,73	4	30000	29996
Al	190	0,42	1,45	346,89	0,005	15,5	15,5
B	189	62,99	46,87	74,41	2,29	234	231,71
Ba	190	0,04	0,09	224,37	0,001	0,68	0,679
Ca	198	1148,24	1636,94	142,56	60,4	12001	11940,6
Cd	190	0,16	0,18	111,39	0,00002	0,66	0,66
Cs	152	0,05	0,07	140,44	0,000224	0,29	0,29
Cu	183	13,46	28,74	213,49	0,001	115	115
Fe	190	2,74	7,22	263,73	0,001	38,1	38,1
K	191	216,88	141,23	65,12	11,9	517	505,1
Li	190	3,06	1,74	56,92	0,0015	7,71	7,71
Mg	196	2372,79	3434,85	144,76	50,5	18600	18549,5
Mn	189	14,61	18,26	124,99	0,001	70,3	70,3
Na	198	16637,88	8316,6	49,99	1160	39900	38740
Ni	190	0,50	1,12	222,31	0,0001	7,66	7,7
Pb	198	0,03	0,08	255,35	0,00001	0,69	0,69
Rb	152	0,37	0,33	88,61	0,004	1,36	1,36
Se	186	0,38	0,46	121,3	0,0001	3,56	3,56
Si	181	23,24	12,57	54,08	3,9	83,4	79,5
Sr	186	10,18	13,38	131,38	0,0995	61,56	61,46
U	167	0,02	0,05	210,06	0,00002	0,33	0,33
Zn	190	3,62	5,29	145,99	0,005	23,2	23,195

El promedio de la alcalinidad, no varía sustancialmente a lo largo del año, mostrando una leve tendencia a aumentar sus concentraciones. El mismo comportamiento, en cuanto a promedio, presenta el potasio, ya que se mueve entre 188,9 mg/l de media en noviembre, para alcanzar los 237 mg/l en agosto.

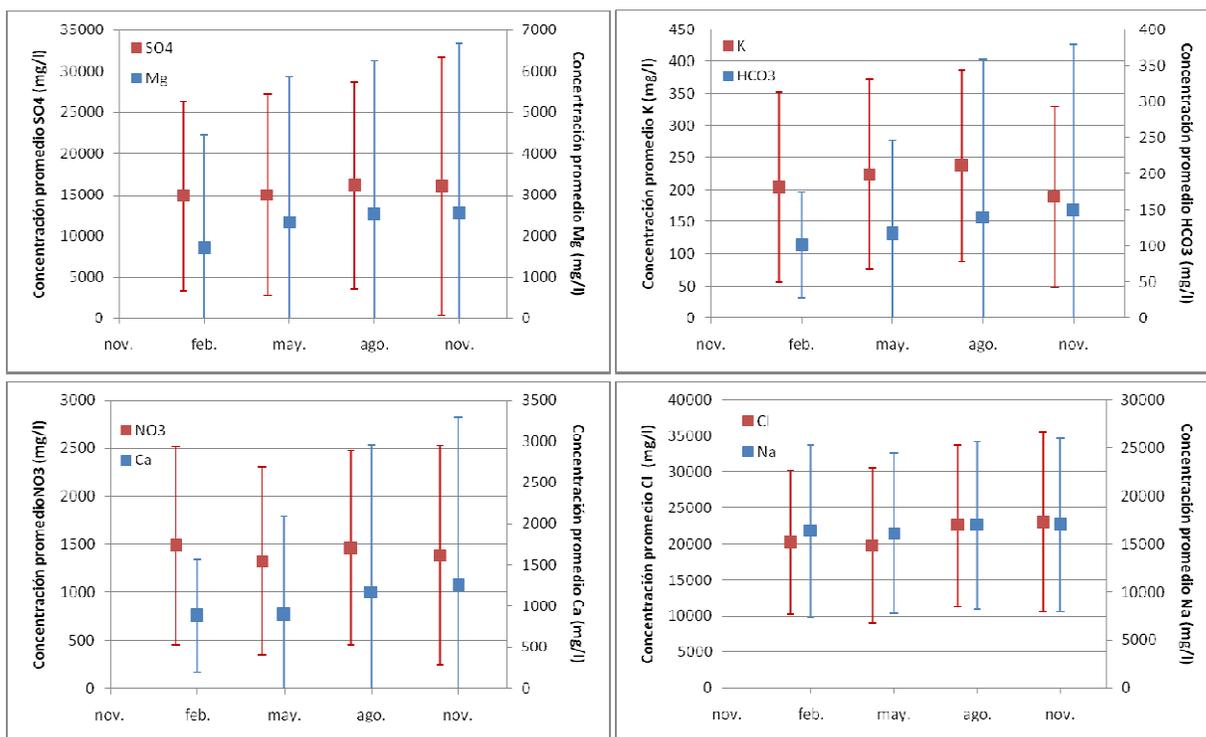


Figura 34. Promedio trimestral de 6 años, muestras filtradas, campañas 2008 a 2013. Barras de error corresponden a una desviación estándar.

La variación en los promedios de sulfato y magnesio muestran un comportamiento similar aumentado durante el año para estabilizarse en agosto y noviembre, exhibiendo el magnesio mayores magnitudes, en cuanto a diferencias, fluctuando entre 1702 mg/l y una media de 2554 mg/l. Otro par de parámetros con comportamiento similar son el sodio y el cloruro, los que ven disminuidos sus promedios en mayo, para luego aumentar variando entre 16127 mg/l y 16966 mg/l para el caso del sodio, mientras que el cloruro fluctúa entre 19830 mg/l y 23063 mg/l. El calcio aumenta sus concentraciones promedio a lo largo del año, variando su media entre 885 mg/l a 1258 mg/l. El nitrato presenta pequeñas variaciones, fluctuando alternadamente con mayores promedios en febrero y agosto. Sin embargo, la alta desviación de los datos en torno al promedio, para los elementos mayores aquí analizados, no permite identificar tendencias estacionales claras.

9.2 Dendrograma, análisis de conglomerados

Utilizando la licencia de evaluación del software Statgraphics, se realiza un análisis de variables con características similares, para un mismo muestreo considerando las campañas comprendidas entre mayo 2012 y noviembre 2013, puesto que presentan una mayor cantidad de pozos monitoreados respecto de las campañas de 2011.

Se debe tener en cuenta que 7 a 12 pozos de monitoreo comprenden este análisis estadístico, por lo que es poco representativo. Para análisis de conglomerados así como de componentes principales, se consideraron las observaciones de cada pozo correspondientes a concentraciones de elementos mayores disueltos (muestras filtradas). Por tanto, se consideran los valores registrados de cloruro, nitrato, sulfato, litio, estroncio, potasio, magnesio, calcio, boro, pH y temperatura.

Para realizar el análisis gráfico de dendogramas, se crea un conglomerado a partir de las variables proporcionadas (pozos de monitoreo). Los conglomerados son grupos de variables con características similares. Para formar los conglomerados, el procedimiento comienza con cada variable en grupos separados. Después, combina las dos variables que fueron las más cercanas para formar un nuevo grupo. Luego de recalcular la distancia entre grupos, se combinan los dos grupos ahora más cercanos. Este proceso se repite hasta que queda un solo grupo. El dendograma muestra como se formó cada uno de los conglomerados. Una línea horizontal conectando dos grupos indica que esos grupos se combinaron a la distancia indicada en el eje vertical.

En la Figura 35, se observa los dendogramas representados según variables y observaciones (pozos) en las fechas indicadas. En Anexos 5.12 y 5.13, se presentan los dendogramas realizados para los datos del periodo entre febrero 2012 y noviembre 2013. Se utiliza el método del vecino más cercano y una métrica de distancia euclídeana cuadrada y euclídeana.

Se observan tres grupos de variables estrechamente relacionadas: corresponden al grupo del Cl, NO₃, Li, B, K y Na; SO₄ y Mg; Ca y Sr. El pH es la variable que presenta una mayor independencia con respecto a los otros parámetros analizados.

Por lo que respecta entre pozos, se observa que la variabilidad registrada para los 12 parámetros principales analizados en esta sección, agrupa 3 comportamientos similares: pozos CB-2, CB-3 y SG-237; CB-4, CB-5, SG-352, SG-493; CB-10 y SG-402. El pozo CB-9 es el que presenta una mayor distancia en el dendograma.

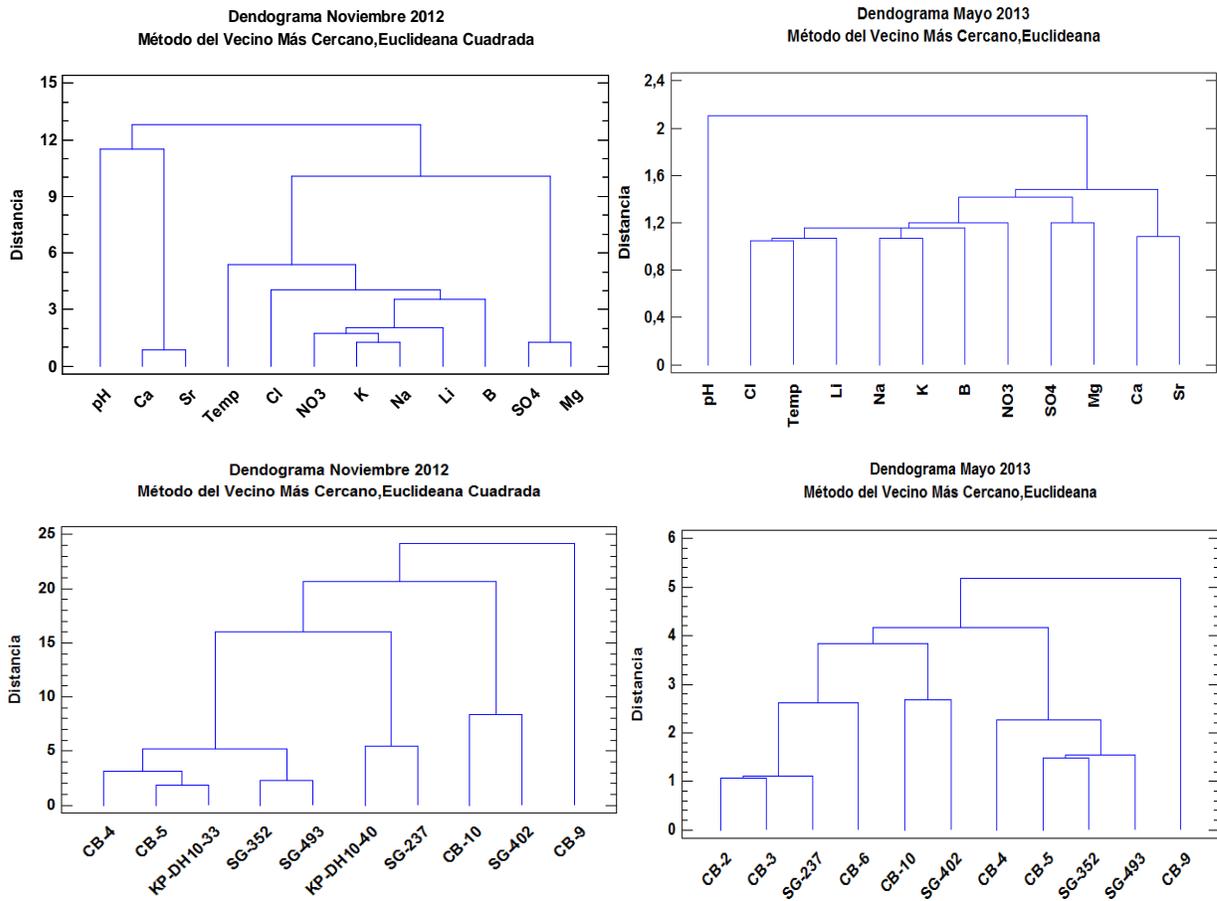


Figura 35. Dendrogramas, campaña noviembre 2012 y mayo 2013, según observaciones (pozos) y variables.

Se debe notar que estos resultados incluyen los pozos que presentaban datos para los 12 parámetros señalados, excluyéndose aquellos casos incompletos. También se debe considerar que durante 2012 y 2013 se incorporaron nuevos pozos de monitoreo y en particular, en las fechas contrastadas en la figura, se reemplazó el monitoreo en los pozos KP-DH10-33 y KP-DH10-40 por los pozos CB-6 y CB-7 respectivamente.

9.3 Análisis de componentes principales

El propósito del análisis es obtener un número reducido de combinaciones lineales, de las 12 variables analizadas que expliquen la mayor variabilidad en los datos. El método utiliza, para tratar los valores perdidos un sistema de eliminación del tipo *listwise*, extrayendo los componentes por el criterio de *Eigenvalor* (valor propio) mínimo. Esto se realiza con el software Statgraphics.

Los resultados obtenidos para los datos del periodo febrero 2012 a noviembre 2013 (analizando cada muestreo de manera independiente), presentan una marcada diferencia en cuanto al número de componentes principales identificados. En el año 2012, se observa que en cada una de las cuatro campañas se extraen 3 componentes que en conjunto explican un porcentaje de 94,19% a 88,96% de la variabilidad observada. En contraste a las campañas registradas en 2013, donde este método para analizar componentes principales, arroja como resultado 4 componentes para cada campaña. Se debe tener en cuenta que desde 2013, se incorporan a la red de monitoreo dos nuevos pozos cuya limpieza y desarrollo no se realizó correctamente por falta de aporte de agua.

A continuación, se detallan los resultados para el monitoreo de noviembre 2012, el cual se considera representativo del periodo. En este caso, 3 componentes se han extraído puesto que tuvieron valores propios mayores o iguales que 1,0. En conjunto ellos explican 88,96% de la variabilidad en los datos originales.

Tabla 8. Análisis de Componentes Principales Noviembre 2012.

<i>Componente</i>		<i>Porcentaje de</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Número</i>	<i>Eigenvalor</i>	<i>Varianza</i>	<i>Acumulado</i>
1	6,01323	50,110	50,110
2	2,56306	21,359	71,469
3	2,09886	17,490	88,960
4	0,581596	4,847	93,806
5	0,357605	2,980	96,786
6	0,202648	1,689	98,475
7	0,159099	1,326	99,801
8	0,0237462	0,198	99,999
9	0,000158194	0,001	100,000
10	2,39873E-16	0,000	100,000
11	0,0	0,000	100,000
12	0,0	0,000	100,000

La Tabla 9, muestra las ecuaciones de los componentes principales. Por ejemplo, el primer componente principal tiene la ecuación:

$$0,334615 * \text{pH} - 0,220329 * \text{Temp} - 0,292202 * \text{Cl} - 0,359241 * \text{NO}_3 - 0,10534 * \text{SO}_4 - 0,324275 * \text{B} + 0,161421 * \text{Ca} - 0,395677 * \text{K} - 0,35625 * \text{Li} + 0,0150387 * \text{Mg} - 0,391913 * \text{Na} + 0,213188 * \text{Sr}$$

En donde los valores de las variables en la ecuación se han estandarizado restándoles su media y dividiéndolos entre sus desviaciones estándar.

Tabla 9. Pesos de los componentes.

	<i>Componente</i>	<i>Componente</i>	<i>Componente</i>
	1	2	3
pH	0,334615	0,116636	0,011902
Temp	-0,220329	-0,321406	-0,340998
Cl	-0,292202	-0,0570053	-0,454364
NO3	-0,359241	0,0758786	-0,0886271
SO4	-0,10534	0,505597	-0,350582
B	-0,324275	-0,0618027	0,312403
Ca	0,161421	-0,457518	-0,328417
K	-0,395677	-0,0287931	0,0707917
Li	-0,35625	-0,132674	0,115195
Mg	0,0150387	0,461524	-0,453323
Na	-0,391913	-0,0756628	-0,0549881
Sr	0,213188	-0,410068	-0,337801

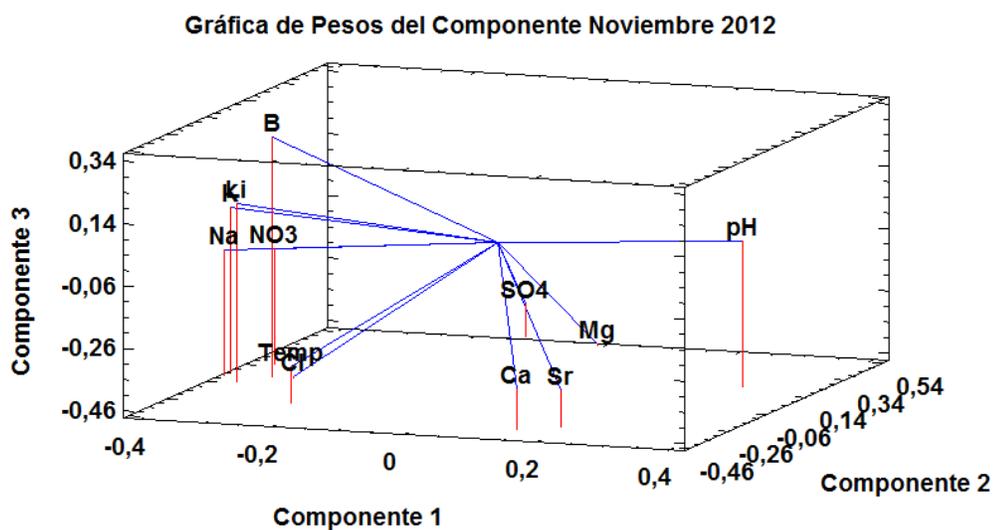


Figura 36. Grafica de pesos ACP noviembre 2012

Este procedimiento permite identificar tres causas principales que originan la variabilidad de los datos, ordenándolas por importancia (ver Figura 36). Es así, como se reconoce que el factor que mayor incide en la variabilidad de los datos, explicando un 50% de sus variaciones, es aquel relacionado con las variables pH, estroncio y calcio. El segundo factor de importancia, explica principalmente las variaciones de sulfato, magnesio y en menor medida, de nitrato. Mientras que el tercer factor, incide en la variabilidad de boro, litio y en menor medida, de potasio.

10 Equilibrio termodinámico

Las aguas subterráneas en el área de estudio circulan por un acuífero que tiene una permeabilidad muy baja. Considerando que estamos ante un sistema con características de acuitardo, resulta una buena aproximación de primer orden, el estudio del sistema asumiendo equilibrio termodinámico. El modelo numérico de flujo planteado (VAIGS, 2014), está basado en datos de permeabilidad (obtenidos con distintos ensayos hidráulicos) así como piezométricos, utilizando el software MODFLOW, proyecta tiempos de residencia del orden de años. Por tanto, como simplificación puede entenderse el sistema desde una perspectiva de equilibrio termodinámico, teniendo como hipótesis que la mayoría de las reacciones químicas que ocurren en este sistema de aguas subterráneas, son más rápidas que la velocidad del flujo. Esto último permite modelar, considerando las condiciones fisicoquímicas del sistema, si una reacción química estable tendrá lugar, así como su sentido y magnitud. Esta aproximación, se hace en un contexto previo a la apertura del rajo, es decir, de línea base puesto que el desarrollo del rajo cambiará el régimen hídrico.

Para aproximarse a los procesos que pueden estar ocurriendo en el flujo de agua subterránea, se focaliza la atención en el perfil A-A' (ver FIGURA 16), con el estudio de especiación e índices de saturación mineral en los pozos próximos al perfil mencionado. También se realiza un modelo inverso, simulando tres escenarios distintos, para contar con una aproximación de los procesos de disolución-precipitación que pueden estar ocurriendo a lo largo de la línea de flujo, que logren explicar las distintas configuraciones químicas observadas en los puntos de monitoreo comprendidos por el perfil A-A' estudiado.

Los pozos incluidos en este estudio son: CB-3, CB-4, SG-493, SG-352, KP-DH10-33. Inicialmente, se planteó un perfil A-A' cuya extensión incluía el pozo KP-DH10-40, lo cual se descartó debido a que no se contaba con información geológica del tramo comprendido entre KP-DH10-33 y KP-DH10-40, de más de 5km. Se elige estudiar el perfil A-A' porque es el tramo que intercepta una mayor cantidad de puntos de control geoquímico, en el sentido del flujo de las aguas subterráneas sumado a que pasa por los dos rajos proyectados. Esto último permite estudiar la evolución de las aguas antes y después de atravesar sectores con mineralización de mena asociada al sistema cuprífero.

Se simulan las posibles reacciones que pueden darse en el sistema (coherentes tanto física como termodinámicamente), considerando la química reportada por el laboratorio y asumiendo que

están en equilibrio. Se determinan las especies disueltas de los elementos cuyas concentraciones fueron obtenidas tras el análisis de laboratorio. También se estudia que fases minerales están en equilibrio con el sistema.

El equilibrio en un sistema multicomponente, se calcula con un modelo numérico que reduce las variables independientes, resolviendo simultáneamente las ecuaciones de balance de masa así como la ley de acción de masas.

10.1 Índices de saturación mineral

La saturación de un fluido con respecto a un mineral (m), se expresa comúnmente por el índice de saturación (SI), el cual es el producto de la actividad iónica (IAP_m) en solución de los iones que forman el mineral, dividido por la constante de equilibrio de la reacción de disolución de ese mineral (K_m), expresada como logaritmo.

$$IS_m = \log\left(\frac{IAP_m}{K_m}\right)$$

Dada esta ecuación, si el agua está subsaturada respecto de cierta fase mineral, se tiene un índice de saturación negativo, lo que indicaría que el agua tiene o tendría capacidad de disolver el mineral si se dan las condiciones, siendo posible que la reacción no haya alcanzado equilibrio ya sea porque el agua no ha estado lo suficiente en contacto con el mineral o no ha reaccionado con el mineral el tiempo suficiente (Craig, 2008), por tanto podría disolverse. Un fluido sobresaturado respecto de un mineral, tiene un índice positivo, y un fluido en el punto de saturación tiene un índice cero por tanto está en equilibrio, sin embargo, en la práctica se acepta un rango de -0.2 a 0.2 para considerar a una fase en equilibrio con el sistema (Merkel, 2002). Un índice de saturación positivo indica que la reacción no está en equilibrio y el agua tiene la capacidad de precipitar el mineral. Dado que estos cálculos no involucran el factor temporal, es posible que esta situación se prolongue en el tiempo conociéndose este estado como equilibrio metaestable.

Se utiliza el software THE GEOCHEMIST WORKBENCH (GW) para calcular los índices de saturación mineral así como la especiación de los elementos, en los pozos cercanos al perfil A-A'. Se estudian las bases de datos disponibles en el software GW, descartándose las bases PHREEQC, Pitzer, Harvie-Moller-Weare, puesto que contienen una base de fases minerales muy

limitada que no incluye minerales representativos de la zona de estudio, así como un modelo de actividad iónica inadecuado para el tipo de aguas aquí estudiado (base modificada de Debye-Huckel). La alta salinidad de las aguas así como el elevado contenido de TDS, significan que la fuerza iónica se encuentre fuera del rango para el cual el modelo de actividad da buenos resultados puesto que el modelo Debye-Huckel modificado, no modela fluidos salinos. Funciona en soluciones de concentración 0,5 molal. A concentraciones de 3 molal, las actividades iónicas se sobreestiman.

Las bases de datos WATEQ4F y MINTEQ arrojan resultados consistentes con el área (en cuanto a fases minerales), y muy parecidos entre si con la ventaja de que la base WATEQ4F contiene una amplia lista de minerales y un modelo iónico más adecuado para la zona.

De la concentración elemental reportada por el laboratorio, se reconocen las siguientes especies en orden de mayor a menor molalidad, considerando las condiciones fisicoquímicas iniciales (solo especies $>1e-4$ molal, son aquí mencionadas): Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} , Mg^{++} , $NaSO_4^-$, $MgSO_4$, NO_3^- , Ca^{++} , K^+ , $CaSO_4$, CO_2 , H_3BO_3 , Li^+ , KSO_4^- , HCO_3^- , H_4SiO_4 , $MnCl^+$, $CuSO_4$, Mn^{++} , $CuCl^+$, $MnSO_4$, Cu^{++} , $NaHCO_3$, Sr^{++} , $CaHCO_3^+$.

En la Figura 37, Figura 38 y Figura 39, se presentan los resultados del cálculo de índice de saturación cuyo valor $IS > -3$ (límite establecido ante la gran cantidad de resultados obtenidos), de los pozos contenidos en el perfil A-A'.

A continuación, se presentan los resultados que arrojaron en común, los distintos periodos monitoreados para cada pozo en estudio. La densidad de la muestra es calculada por el software utilizando la clorinidad o la cantidad de TDS del sistema, siendo el método escogido en este estudio, el que utiliza la clorinidad.

Las aguas pertenecientes a los pozos que se indican a continuación, presentan un $IS > 0$ para las siguientes fases minerales:

- CB-3: pirolusita, talco, cuarzo, barita, óxidos de manganeso, tremolita, cuarzo, barita y calcita.
- CB-4: leonhardita, mica potásica, pirofilita, alunita, caolinita, beidellita, montmorillonita, illita, anita, diasporo, gibsita, albita, barita y yeso.
- SG-493: mica potásica, pirofilita, alunita, pirolusita, caolinita y diasporo.

- SG-352: leonhardita, mica potásica, pirofilita, alunita, pirolusita, caolinita, beidellita, montmorillonita, illita, cuarzo, albita y atacamita.
- KP-DH10-33: pirolusita, mica potásica, alunita, caolinita, beidellita, montmorillonita, cuarzo y barita.
- KP-DH10-40: pirolusita, mica potásica, pirofilita, anita, caolinita, montmorillonita, beidellita, diasporo y talco.

Las aguas pertenecientes a los pozos que se indican a continuación, presentan un $IS \sim 0 (\pm 0,2)$ para las siguientes fases minerales:

- CB-3: anhidrita, aragonito, calcedonia, dolomita, celestita y yeso.
- CB-4: anhidrita, anortita, aragonito, calcita, dolomita y celestita.
- SG-493: anhidrita, celestita y yeso.
- SG-352: anhidrita, atacamita, yeso y barita.
- KP-DH10-33: anhidrita, yeso y atacamita.
- KP-DH10-40: calcita, yeso y calcedonia.

Las aguas pertenecientes a los pozos que se indican a continuación, presentan un $IS < 0$ para las siguientes fases minerales:

Fases minerales subsaturadas;

- CB-3: magnesita, rodocrosita, malaquita, atacamita y crisotilo.
- CB-4: dolomita, malaquita, atacamita, prehnita, wairakita, siderita, rodocrosita, azurita, halita, clorita y antlerita.
- SG-493: gibsita, beidellita, montmorillonita, halita y albita.
- SG-352: celestita, antlerita, brocantita, azurita, rodocrosita, halita y calcita.
- KP-DH10-33: malaquita, antlerita, brocantita, azurita, calcita y rodocrosita.
- KP-DH10-40: dolomita, alunita, anhidrita, celestita, malaquita, siderita, atacamita, azurita y brocantita.

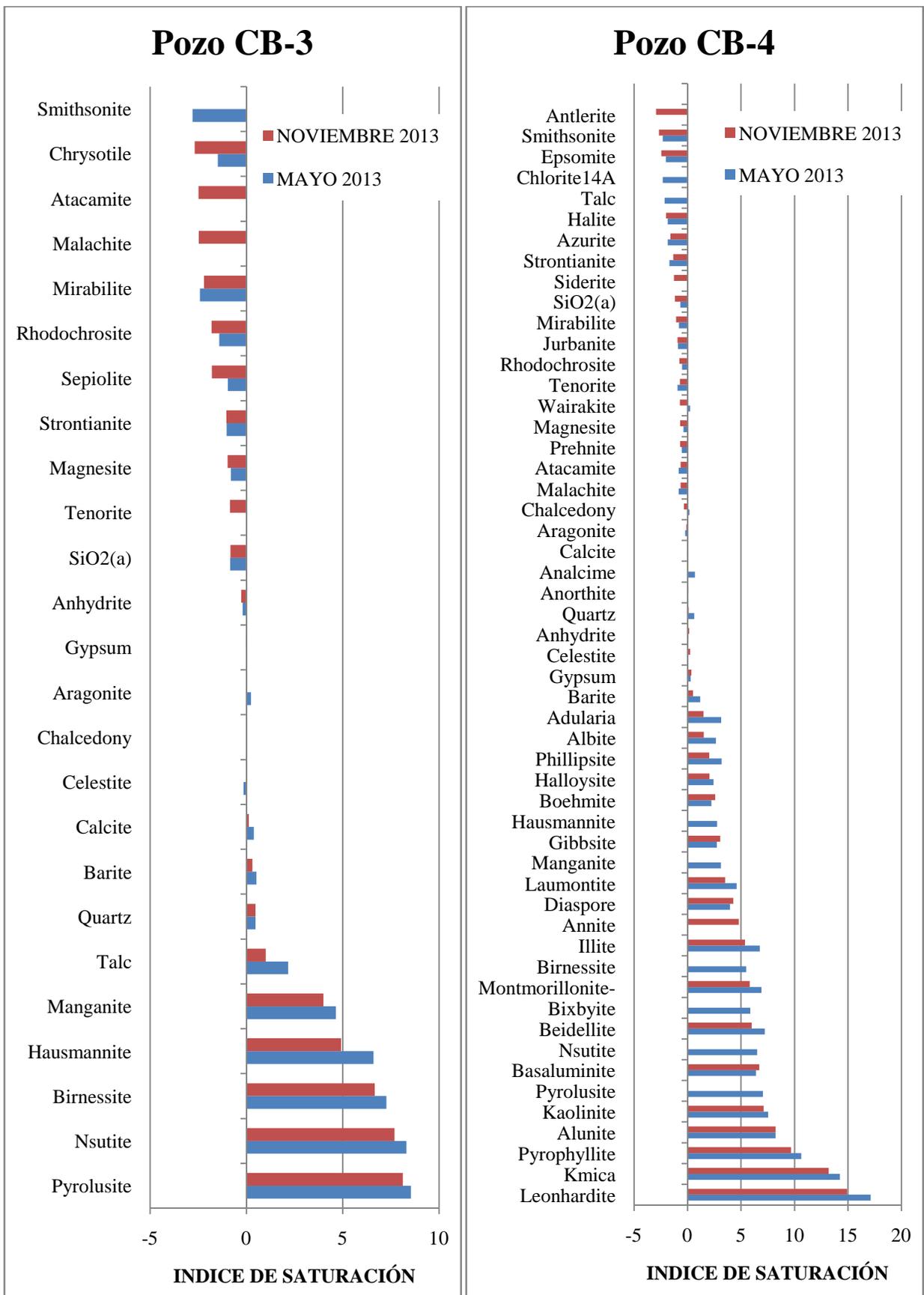


Figura 37. Índice de saturación, pozo CB-3 (izq.) y CB-4 (der.).

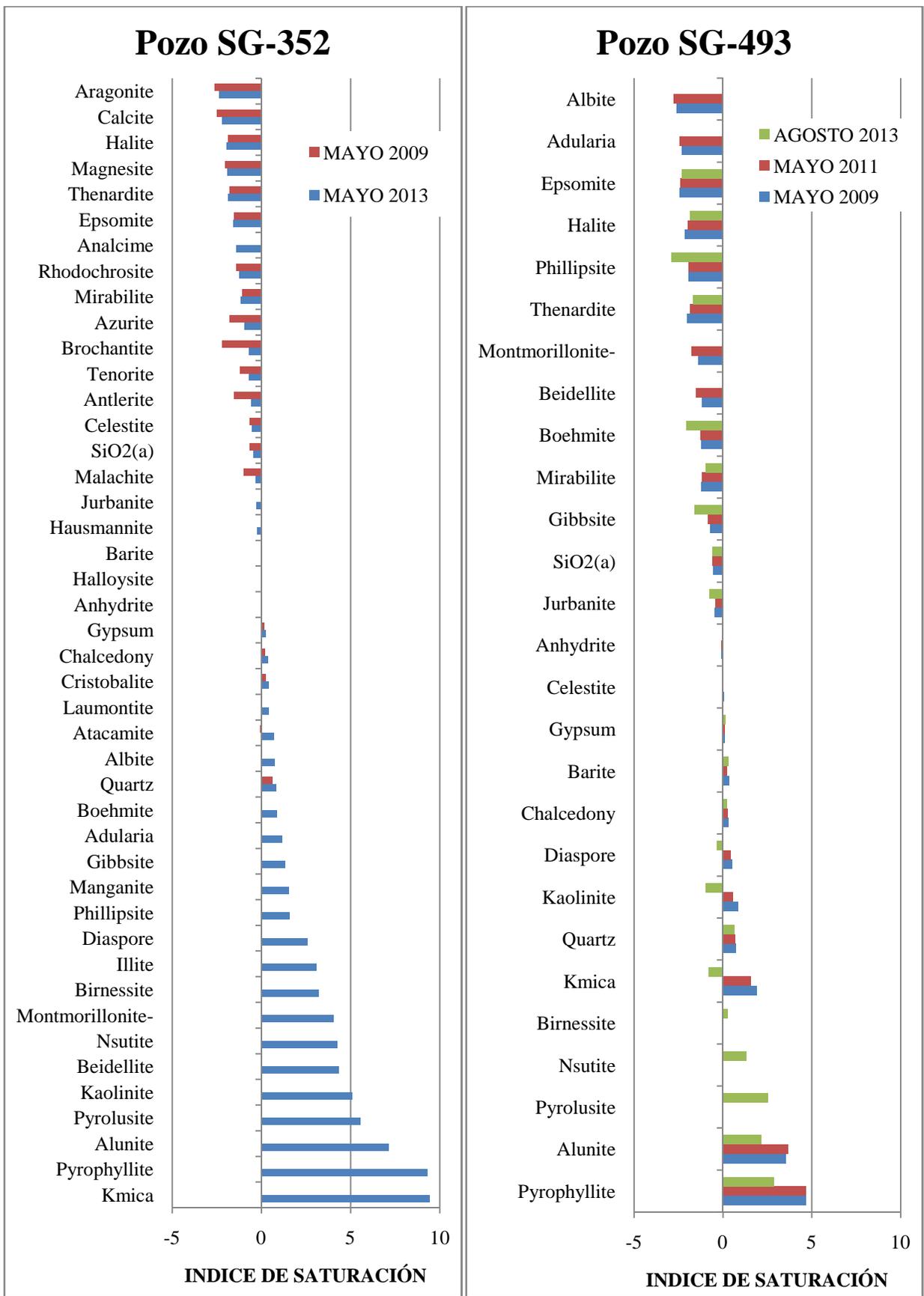


Figura 38. Índice de saturación, pozo SG-352 (izq.) y SG-493 (der.).

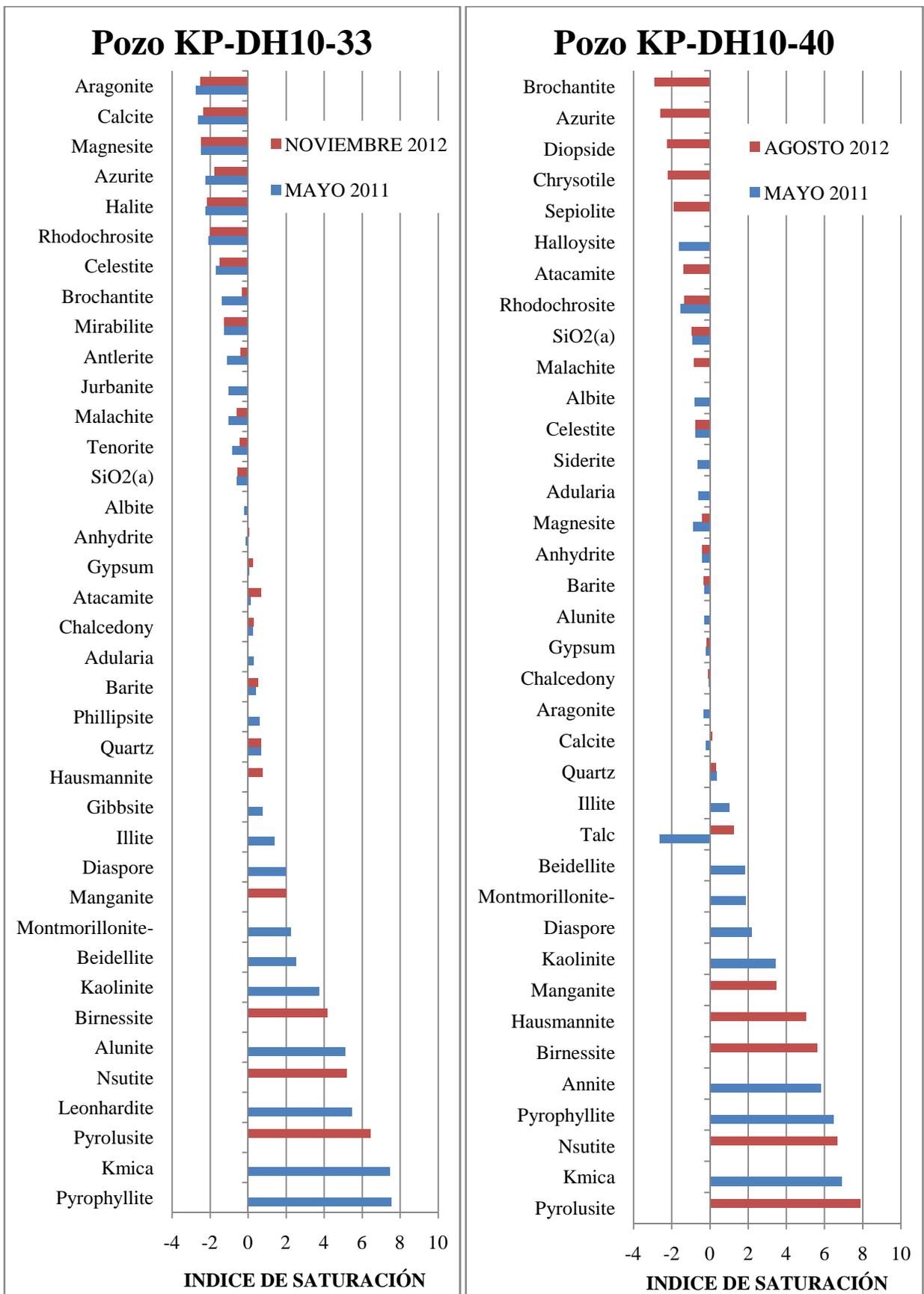


Figura 39. Índice de saturación, pozo KP-DH10-33 (izq.) y KP-DH10-40 (der.).

Se tiene registro de calidad de agua del pozo **CB-3** desde febrero de 2013, por lo que se utilizan los datos obtenidos desde el monitoreo del siguiente trimestre, para asegurar que no exista contaminación en la química del agua debido a residuos del proceso de perforación. Entre mayo de 2013 y noviembre del mismo año, se observan las mismas fases minerales en estado de sobresaturación, con la diferencia de que los índices de saturación calculados disminuyen de un periodo a otro, para todos los minerales sobresaturados. Destacan oxi-hidroxidos de manganeso así como sulfatos de Ba y silicatos de Ca y Mg, entre los minerales sobresaturados. Por el contrario, los elementos que se encuentran en el rango establecido como equilibrio, aumentan su IS, manteniéndose sin embargo, entre -0,2 y 0,2. Las fases en equilibrio corresponden a carbonatos de Ca y Mg así como sulfatos de Ca y Sr. Entre ambos periodos, se suman entre los minerales subsaturados, con un índice mayor a -3, óxidos, carbonatos y haluros de Cu, como la tenorita, malaquita y atacamita, los cuales no se presentaban en el umbral descrito, para mayo 2013. Los principales minerales subsaturados son carbonatos de Mg, Sr, Mn, Zn y Cd así como sulfatos de Na.

El pozo **CB-4**, al igual que CB-3, es monitoreado desde febrero 2013, por lo que se estudia la evolución respecto de índices de saturación entre el monitoreo de mayo del 2013 y noviembre del mismo año. En noviembre aparecen dos nuevas fases sobresaturadas, ferrita cuprosa y anita, mientras dejan de presentarse fases asociadas al manganeso, debido al descenso de la concentración de Mn registrado en esa fecha. En general, el IS disminuye para los minerales sobresaturados, los que se mantienen estables en esta posición desde mayo de 2013, observándose micas, una amplia variedad de arcillas, incluida la esmectita, así como ceolitas, oxi-hidroxidos de Al, feldespatos (albita, adularia) y sulfatos de Ba y Ca. En equilibrio se encuentran sulfatos de Sr y Ca, plagioclasa cálcica así como cuarzo y carbonatos de Ca y Mg. Subsaturadas se presentan ceolitas, carbonatos de Fe, Sr, Mg, Cu, Mn, Na, Pb y Zn, así como sulfatos hidratados de Al, de Mg y de Na.

En CB-4, respecto de CB-3, no se encuentra en equilibrio el yeso y si lo está el cuarzo y la anortita, sumado a la amplia sobresaturación de arcillas, oxi-hidroxidos de aluminio y ceolitas en CB-4.

El pozo **SG-493** cuenta con un registro mucho más amplio, puesto que es analizado desde el inicio del muestreo, en 2008. Se contrastan los cambios observados en el cálculo del IS para las campañas de mayo 2009, mayo 2011 y mayo 2013. Se observan índices con leves diferencias entre mayo de 2009 y agosto 2013, mientras que los resultados de mayo 2011 se alejan de ambos

comportamientos, mostrando en general índices de saturación más elevados para todas las fases comunes con los otros periodos. En general, la sobresaturación se presenta en fases de óxidos de Mn, alunita, pirofilita, mica potásica y caolinita, las que corresponden a asociaciones minerales de alteración hidrotermal. En equilibrio se encuentran sulfatos de Ba, Ca y Sr así como sílice microcristalino. Subsaturada están las fases de sulfato de Al, Mg, Pb y de Na hidratado, esmectita, oxi-hidroxidos de Al y de Mn así como plagioclasa sódica y feldespato potásico.

El pozo **SG-352**, fue monitoreado desde 2008 hasta mayo de 2013, por lo que aquí se comparan dos monitoreos: mayo de 2009 y mayo de 2013. Se observan grandes diferencias entre ambos periodos, en contraste a lo observado en el pozo histórico SG-493. En mayo de 2009, la única fase sobresaturada es el cuarzo, encontrándose en equilibrio la atacamita, yeso, anhidrita y calcedonia. Muy por el contrario, en mayo de 2013, 25 fases minerales se encuentran sobresaturadas, donde predominan la mica potásica, oxi-hidroxidos de Mn, de Al y de Fe, ceolitas, arcillas incluidas esmectitas, pirofilita, alunita, atacamita y cuarzo microcristalino. A diferencia de mayo 2009, en agosto 2013 se encuentra en equilibrio la malaquita, arcillas así como sulfatos de Ca y Al. Las fases subsaturadas no varían sustancialmente en cuanto al tipo, pero si el valor calculado del índice de saturación, el cual aumenta para todos los casos: predominan sulfatos de Na, Cu, Mg y Sr, así como carbonatos de Mg, Na y Cu, destacando los minerales de cobre antlerita, brocantita, azurita y tenorita, los cuales se observan subsaturados en CB-4 con un $IS > -3$, no así en SG-493, donde presentan valores aún más bajos.

El pozo **KP-DH10-33**, cuenta con registros hasta noviembre de 2012, por lo que se analizan los resultados de mayo 2011 y del último monitoreo. La principal diferencia entre las fases minerales con índice positivo, es la ausencia de arcillas en 2012 entre las fases sobresaturadas, siendo las únicas fases comunes entre ambos periodos, el cuarzo y barita. Respecto al equilibrio, se reconocen en común solo la anhidrita, ya que la calcedonia, atacamita y yeso se encuentra sobresaturado en agosto de 2012. En cuanto a los minerales subsaturados, se reconocen las mismas fases en ambos momentos, con índices más altos en el monitoreo más reciente, apareciendo nuevamente los minerales de Cu, tenorita, malaquita, antlerita, brocantita y azurita.

Se estudia el monitoreo de mayo 2011 y agosto 2012 en el pozo **KP-DH10-40**, observándose que los minerales sobresaturados no coinciden en ambas campañas, teniendo como única fase común el cuarzo. En equilibrio se encuentra la calcita, calcedonia y yeso. Subsaturado se encuentra la atacamita, azurita, brocantita y malaquita.

10.2 Modelo inverso

Se modela inversamente el flujo de agua, con el objetivo de identificar las reacciones responsables de la evolución en la composición del agua observada en la línea de flujo. Se busca entender los procesos de disolución-precipitación que un fluido entrante en el sistema pueda experimentar como resultado de la interacción agua-medio hospedante. Para esto, se utiliza el software PHREEQC 3.1.1, puesto que es posible modelar el sistema de manera simplificada, respecto del software GW el cual requiere la especificación de parámetros que se desconocen en este estudio.

El procedimiento que realiza el programa a nivel conceptual, es comparar la concentración elemental de un punto, respecto de un segundo punto y tras calcular la especiación de dichos elementos, plantear soluciones respecto de procesos de precipitación y disolución que relacionan de mejor manera ambas concentraciones químicas. Por tanto, el programa calcula los moles de minerales y gases que deben entrar o salir de la solución, para generar las diferencias observadas en la línea de flujo. Para ello, se debe especificar, junto con las concentraciones reportadas por el laboratorio, las fases minerales presentes en el acuífero así como la incertidumbre admitida en el análisis. También se debe indicar los elementos químicos sobre el cual se realizará el balance y la tolerancia aceptada. El programa permite definir límites de incertidumbre para toda la información analítica, quedando a criterio del modelador exigir que la solución del modelo inverso satisfaga el balance de moles para los elementos seleccionados, así como el balance de carga para cada solución.

Considerando la información geológica disponible (ver Tabla 10), se definen 19 fases minerales representativas del acuífero: Albita, Anita, Atacamita, Beidellita, Brocantita, Calcita, Calcedonia, Calcopirita, Clorita, Flogopita, Goethita, Yeso, Hematita, Illita, Feldespato potásico, Mica potásica, Montmorillonita cálcica, Pirita y Cuarzo.

El modelo inverso se desarrolla proporcionando inicialmente una configuración química del agua que entra al sistema y una segunda configuración, la cual se reproduce a partir del agua entrante a través de la interacción con el medio hospedante, representado por las 19 fases indicadas. El resultado son soluciones donde se indican procesos de precipitación o disolución de dichas fases. El programa busca generar soluciones donde se utilice el mínimo de fases posible. Se debe notar que se generan múltiples soluciones para cada caso, más aún considerando que se plantea un sistema

con muchas fases minerales. Los resultados indican la fracción de la solución inicial utilizada para reproducir el segundo punto, así como los moles de transferencia para cada fase.

Tabla 10. Minerales presentes en perfil A-A'.

		Tramo CB-3 a CB-4	Tramo CB-4 a SG-493	Tramo SG-493 a SG-352	Tramo SG-352 a KP-DH10-33	Tramo KP-DH10-33 a KP-DH10-40
		Mineral	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral
Fuente	Mapeo	Calcita Yeso Clorita Mica K (sericita) Cuarzo Hematita Goetita Calcopirita Anita	Se reporta: alteración Cuarzo-Sericita, sulfuros primarios, lixiviado. Litología Toba	Calcopirita, pirita, óxidos verdes, lixiviado con cobre. Litología: Monzodiorita, brecha de turmalina	Discontinuidades rellenas con limonita, halita, yeso, clorita, cuarzo, mineralización de cobre. Litología pórfido feldespático, granodiorita porfirica	Halita, limonita, calcita, clorita, óxidos de manganeso, mica. Litología Granodiorita.
	Perfil, definición de unidades e interpretación	Beidellita Calcedonia Illita Montmorillonita Albita Feld. K	Cuarzo - Sericita Toba Lixiviado Sulfuros primarios	Cuarzo - Kmica Illita Albita Anita Calcita Calcedonia Epidota Goetita Limonita Hematita Pirita Calcopirita Bornita Galena Esfalerita	Calcita Siderita Yeso Esfalerita Albita Dolomita Mica K Calcosina Brocantita Illita Galena Hematita Goethita Calcedonia Beidellita Atacamita Montmorillonita Anita Feld. K Clorita	Calcita Atacamita Albita Mica K Brocantita Illita Pirita Hematita Goethita Calcedonia Beidellita Montmorillonita Calcopirita Anita Feld.K Dolomita

Se establece por defecto, una incertidumbre para cada dato analítico, excepto el pH, de 0.1. Para los siguientes elementos se especifica la incertidumbre: Cl, Ca, S(+6), Cu, Na, Mg, Alcalinidad, K, Li, Ba, Fe, Si. Adicionalmente se calcula el balance de cargas para cada solución, balance de electrones y de agua para el sistema.

Los resultados en PHREEQC se presentan en tres columnas donde la primera corresponde a la información analítica reportada; la segunda columna contiene los ajustes hechos por el modelo, dentro del rango de la incertidumbre; la tercera columna indica la información utilizada para el modelo, la cual es la suma de las dos primeras columnas. También se indica la fracción relativa de cada solución en el modelo inverso. En el caso de dos soluciones, un valor usual es 1,0. Esta fracción es derivada del balance de moles en agua, por lo tanto, si minerales hidratados consumen o producen una cantidad significativa de agua, la fracción puede no sumar 1.

Los resultados incluyen otro bloque de datos, donde se describen la transferencia en moles de las fases. Este resultado, corresponde al modelo inverso que es consistente con los ajustes indicados

en la lista de soluciones, es decir, la primera solución ajustada más la transferencia de moles iguala exactamente la composición ajustada de la segunda solución. Transferencia de moles negativos indica precipitación mientras que valores positivos señalan disolución. Estos valores son relativos a las fases y no a la solución, por lo que valores positivos significan un incremento en la fase y negativos un descenso en ella.

Dado que no existe una fecha de monitoreo común para todos los pozos contenidos en el perfil, se utilizan los resultados de dos campañas de muestreo, escogidas por su buen balance iónico. Para los pozos CB-3, CB-4, SG-352 y SG-493, se utilizan los datos obtenidos en el monitoreo de mayo 2013, mientras que para los pozos KP-DH10-40 y KP-DH10-33 es el registro del monitoreo de agosto 2012 el escogido. Se ingresan los siguientes parámetros para las 6 soluciones estudiadas: pH, alcalinidad, temperatura, pe. Cl, N(5), S(6), Al, B, Ba, Ca, Cd, Cu, Fe K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Se, Si, Sr, U y Zn.

Se estudian tres escenarios, con el objetivo de testear la hipótesis de que el sistema de estructuras N-S existente entre Pampa Lina y el área del proyecto, tiene una influencia en el flujo de agua subterránea: el primero consiste en que a partir de la configuración química observada en el pozo CB-3 (CB-3 como "fresh water"), se pueden reproducir las aguas observadas en los pozos aguas abajo del sentido de flujo de agua subterránea, contenida en el perfil A-A'. El segundo escenario, consiste en considerar que las aguas evolucionan a partir de la configuración observada en el pozo CB-4 (CB-4 como "fresh water"). La tercera posibilidad, es que las aguas observadas en los pozos, corresponden a una mezcla de las configuraciones químicas registradas en los pozos CB-3 y CB-4 (CB-3 y CB-4 como "fresh water"). Esto último se estudia hasta el pozo SG-352. En el siguiente capítulo, se explica el motivo de este estudio.

- **CB-3 como "fresh-water"**

Para el tramo CB-3 a CB-4, se obtienen 1161 modelos inversos, especificando valores de incertidumbre entre 0,04 y 0,08 para 12 parámetros. Todas las soluciones arrojan una fracción relativa para la solución CB-3, de 3. Hay 6 fases comunes en todos los modelos, que usan 13 de las 19 fases disponibles. De estos minerales, atacamita y calcita tienen una transferencia positiva, mientras que clorita, pirita, calcopirita y mica potásica, se encuentran precipitando o disolviéndose en todos los resultados. Otra fase recurrente, en casi todos los resultados, es el yeso el cual siempre

se presenta precipitando, a la vez que la montmorillonita y goethita se presentan tanto con una transferencia positiva así como negativa.

Para el tramo CB-3 a SG-493, existen 1797 soluciones, donde todos los parámetros tienen una incertidumbre que corresponde al valor por defecto aquí establecido, de 0,1. La mayoría de las soluciones, indica una fracción sobre 1,6 para la solución CB-3, encontrándose muy pocos modelos con una fracción cercana a 1. Las principales diferencias entre los resultados, corresponden al valor de transferencia molar de la calcopirita (positivo o negativo) así como la participación de las fases pirita y goethita (algunos modelos incluyen la una o la otra). Las fases minerales que se mantienen presentes en todos los modelos son yeso, beidellita, atacamita, calcita y anita como fases en disolución, y clorita, brocantita, mica K, montmorillonita y feldespatos K, en precipitación.

En el tramo CB-3 a SG-352, se plantean 3605 modelos, con incertidumbre de 0,1 para todos los parámetros. Pocos resultados tienen una fracción relativa en torno a 1, encontrándose soluciones con fracción 0, y múltiples modelos con una fracción relativa de la solución CB-3, entre 3 y 6. Se observa que los resultados con una alta fracción, y por tanto, más concentrados, requieren una menor cantidad de fases para ajustar las variaciones comprendidas en el tramo descrito. De las soluciones con una fracción relativa en torno a 1 (0,9 a 1,12), se observa que existen fases comunes a todos los modelos como lo son la atacamita, beidellita, calcita, yeso y montmorillonita, donde los cuatro primeros presentan en la mayoría de los casos, una transferencia de moles positiva, significando disolución mientras que la montmorillonita presenta valores negativos, es decir, precipitación.

En el tramo CB-3 a KP-DH10-33, se obtienen 1018 modelos, observándose que al aumentar la cantidad de elementos utilizados para acotar la incertidumbre a un valor menor que el definido por defecto (0,1), se genera una mayor cantidad de modelos. Es por ello, que se mantuvo el valor de 0,1 para todos los parámetros. Predominan soluciones con una fracción relativa de CB-3 de 4,8 a 5, utilizando 12 fases de las 19 representativas del acuífero. De las soluciones con una fracción cercana a 1, destacan fases comunes a todos los modelos con una transferencia molar positiva, como lo son las fases en disolución atacamita y calcita así como la precipitación de clorita. Otros minerales comunes a todas las soluciones son mica K, brocantita y yeso, los cuales presentan índices de transferencia tanto positivos como negativos.

En el tramo CB-3 a KP-DH10-40, se generan 1828 modelos inversos, con una incertidumbre de 0,04 para el Cl y de 0,05 para el Ca, asignando al resto de los parámetros el valor por defecto (0,1). Todas las soluciones presentan una fracción relativa de CB-3 en torno a 0,06, además de utilizar entre 13 y 14, de las 19 fases disponibles. Calcita y atacamita son fases en disolución presentes en todos los resultados. Otras fases muy comunes son clorita, hematita, flogopita y calcopirita las cuales precipitan o se disuelven según el resultado, mientras que el yeso solo se disuelve para todos los casos en donde aparece así como la illita solo precipita.

- **CB-4 como fresh water**

Para el tramo CB-4 a SG-493, se generan 2605 resultados. La incertidumbre para el Cl es de 0,04 y 0,05 para el Ca, teniendo los otros parámetros, una incertidumbre de 0,1. Las soluciones utilizan entre 9 y 12 fases para ajustar las variaciones químicas entre ambos puntos. La fracción relativa de CB-4 es de 0,85. La única fase con un comportamiento igual para todas las soluciones, es la calcita que se encuentra en disolución. Otra fase común es la goethita, la cual se presenta en algunos modelos como en disolución y en otros se calcula su precipitación. La misma situación ocurre con las fases recurrentes flogopita, pirita, yeso y clorita. Si bien la hematita no figura en todos los modelos, si se observa que presenta un unico comportamiento, con una transferencia negativa de moles.

Para el tramo CB-4 a SG-352, se obtienen 4026 modelos, con una incertidumbre por defecto de 0,11 mientras que para el Cl se establece 0,1. Todos los resultados presenten una fracción relativa de CB-4, cercana a 1, utilizando entre 12 y 11 fases para describir la evolución del sistema. El único mineral común a todas las soluciones, es la calcita, la cual se encuentra precipitando. Goethita, yeso y clorita son fases recurrentes que, cuando se presentan, tienen una transferencia molar positiva (disolución), mientras que el agua respecto de la hematita se encuentra sobresaturado.

En el tramo CB-4 a KP-DH10-33, se define una incertidumbre de 0,05 para 8 parámetros y una de 0,04 para el Cl siendo la incertidumbre por defecto 0,1. Se obtienen 2873 soluciones, las cuales presentan una fracción relativa de CB-4 que varía entre 0,6 a 0,661, utilizando entre 10 y 12 fases para describir las variaciones del sistema. La única fase que aparece considerada en todos los resultados, es la calcita, la cual estaría precipitando. Otras fases recurrentes son el yeso y la brocantita, las que estarían disolviéndose así como la hematita que estaría precipitando. También

aparecen las fases atacamita, goethita, clorita, flogopita y calcopirita, sin mostrar un comportamiento único en los distintos modelos (disolución o precipitación).

Entre CB-4 y KP-DH10-40, se plantean 2482 modelos, donde para todo el sistema se establece un criterio de 0,1 para la incertidumbre. La fracción molar de CB-4 es muy baja, del orden de 0,01 a 0,02, indicando transferencias molares para 12 a 13 fases. Se identifican tres fases comunes a todos los resultados, encontrándose en disolución las fases atacamita, calcita y beidellita, siendo esta última, una fase que también se presenta en otros resultados precipitando. También se presenta con frecuencia el yeso, el que siempre está en disolución, así como la goethita, la cual está tanto en precipitación como disolución.

- **CB-3 y CB-4, como fresh water**

Hasta SG-493, se obtienen 4839 modelos, de los cuales pocos modelan un escenario con mezcla entre CB-3 y CB-4, abundando resultados que solo consideran a CB-4. En los modelos con mezcla, se calcula una fracción de 0,24 a 0,17 para CB-3 y 0,76 a 0,83 para CB-4. La incertidumbre para todos los parámetros es de 0,1 con 7 a 12 fases que describen la evolución del sistema, que tienen como mineral común a la brocantita en disolución. Calcita y feldespató potásico también son comunes, presentándose con una transferencia molar negativa o positiva.

En el tramo hasta SG-352, se generan 1641 modelos. La incertidumbre para todos los parámetros es de 0,1. Al contrario del tramo anterior, se genera una gran cantidad de soluciones que consideran la mezcla de CB-3 y CB-4, observándose algunos casos en que la fracción relativa de CB-3 es varias veces mayor a 1, mientras que CB-4 es de un orden de magnitud menor. Sin embargo, la solución más frecuente plantea una fracción relativa de CB-3 entre 0,2 y 0,3 mientras que para CB-4 la fracción es de 0,79 a 0,95. Las fases comunes a todos los resultados son: calcita, clorita y mica potásica, donde solo la calcita muestra un único comportamiento, de precipitación. Otras fases recurrentes son atacamita, siempre en disolución, y anita precipitando.

11. Discusiones

Las aguas aquí estudiadas, según la secuencia de Chevotarev, corresponde a la de un sistema tras un largo tiempo de residencia en un acuífero, donde procesos de precipitación-disolución como disolución de sulfatos, precipitaciones de sulfuros, intercambio catiónico, adsorción, oxidación-reducción, así como mezcla de aguas profundas, tienen lugar originando una configuración evolucionada de las aguas, donde predomina el Na y el Cl.

Por tanto, la relación de los resultados obtenidos en cuanto a la distribución espacial de la geoquímica registrada en el acuífero, así como su evolución en el tiempo y el espacio, es fundamental para aproximarse al entendimiento del acuífero. En particular, desde una perspectiva de los procesos que esta puede estar experimentando tras su interacción con el medio hospedante, considerando las condiciones fisicoquímicas del sistema.

En el proceso de validar la información registrada en la base de datos, se observa que durante 2013, tras la habilitación de los pozos CB-6 y CB-7, existe un comportamiento inconsistente con la química históricamente monitoreada en sectores próximos, como lo son los datos obtenidos en los pozos KP-DH10-33 y KP-DH10-40. Analizando los niveles de agua en estos pozos, se observa que el pozo CB-7 ha tenido un descenso en el nivel de 29,76 m desde su instalación, lo cual ha ocurrido de manera esporádica, asociado al purgado para muestreo de geoquímica (el que se realiza trimestralmente).

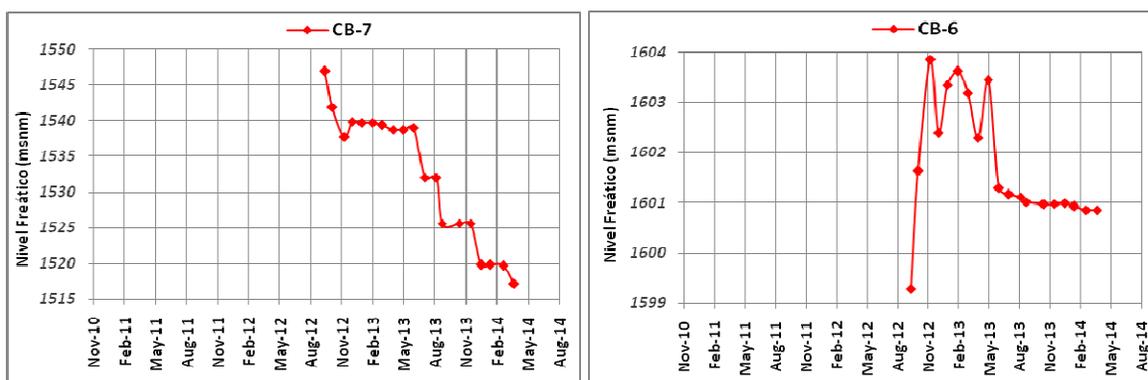


Figura 40. Nivel freático, pozo CB-7 (izq.) y pozo CB-6 (der.).

Actualmente el nivel freático del pozo CB-7 (1525,59 m.s.n.m.), se encuentra por sobre el nivel registrado en KP-DH10-40 (1495,2 m.s.n.m.). Por lo tanto, se discute la posibilidad de que este

pozo contenga fluidos residuales del proceso de perforación, sobre todo considerando que tras el cual, no se pudo realizar una limpieza debido al bajo aporte de agua de la napa. La misma curva que describe el nivel freático (ver Figura 40), permite plantear que este pozo no está en equilibrio con su entorno, ya que pareciese no haber una conexión con el acuífero, registrando un descenso en el nivel asociado a la extracción de agua durante la purga trimestral (monitoreo geoquímico).

Por otro lado, el pozo CB-6 está recientemente mostrando un comportamiento similar al histórico observado en cuanto a niveles y química. Sin embargo, esto es muy reciente por lo que también se descartan los datos obtenidos en este pozo al momento de estudiar el comportamiento geoquímico del área del proyecto. Es por este motivo que se presentan en los capítulos anteriores, los resultados de los pozos KP.

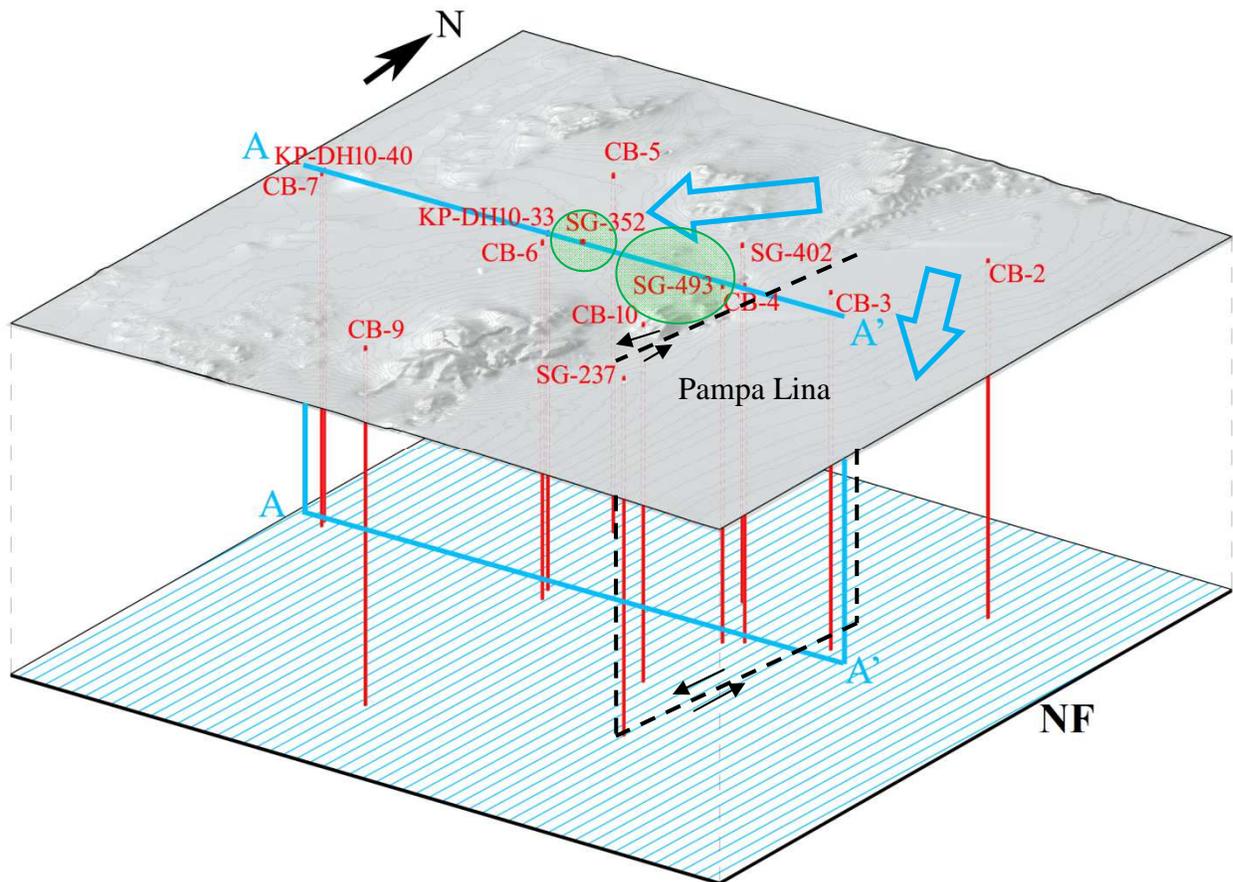


Figura 41. Superficie zona de estudio*, con proyección de nivel freático -NF- (exagerado).

*Flechas azules indican sentido de flujo. Líneas punteadas representan sistema de fallas de rumbo. Elipses verdes indican rajo Catabela y Salvadora.

Del análisis de componentes principales (ACP) se identifican 3 factores que controlan la variabilidad de los datos en 2012 y 4 en 2013. Este cuarto factor está relacionado con la habilitación de los pozos, en particular de CB-6 y CB-7, puesto que al no incluir en el análisis estadístico a esos pozos, el ACP arroja nuevamente 3 factores que explican la variabilidad de los datos.

En la distribución espacial de los diagramas Stiff, se observan claramente dos grupos de aguas, con signaturas químicas muy distintas. En el sector de Pampa Lina, los pozos CB-2, CB-3 y SG-237 presentan concentraciones de cloruro considerablemente más bajas que el resto de la zona estudiada. El ion Cl es considerado conservativo, puesto que es menos reactivo que los otros iones mayores aquí analizados, por lo que se puede plantear, como aproximación de primer orden, que estas aguas provienen de un sector del acuífero distinto de aquellas observadas en CB-4 o QSG08-493, ubicados al extremo Este del futuro rajo, próximo a Pampa Lina. Ambos grupos están separados por la estructura mayor que limita el sector Este del área del proyecto con Pampa Lina (ver Figura 41).

Analizando los niveles freáticos del área del proyecto, se observa que los pozos de observación al Oeste de la estructura de falla mayor de orientación NS, se encuentran a una elevación mayor que aquellos niveles monitoreados en el sector de Pampa Lina (al Este de la zona de falla). En el capítulo de hidrografía regional y local, se señala que en la zona de Pampa Lina, el sentido del flujo tiene orientación NE-SW, por tanto, se descarta una descarga desde el área del proyecto hacia Pampa Lina, puesto que esta dirección no es consistente con el gradiente local de las aguas subterráneas. Por lo que se plantea una desconexión entre ambos sectores, donde esta estructura actuaría como barrera impermeable. Esta hipótesis se testea con las simulaciones inversas realizadas en el apartado 10.2.

Los resultados obtenidos para la simulación inversa de los casos planteados, muestran que un escenario donde la evolución geoquímica de las aguas observadas en el perfil A-A', aguas abajo del sentido de flujo, a partir de la configuración observada en CB-3 hasta el punto CB-4, requiere la existencia de procesos de precipitación-disolución que logren concentrar 3 veces la química observada en CB-3. Esto último, es factible si se consideran activos procesos de evaporación o una cinética de disolución de las fases involucradas, lo suficientemente rápida para generar una evolución química que responda a la configuración registrada en CB-4. En este tramo, se plantea la disolución de atacamita y calcita, los cuales son minerales con una escasa distribución en el tramo estudiado, presentes en fracturas rellenando espacios. También se plantea el desequilibrio

de fases como clorita, piritita, calcopiritita y mica potásica, de las cuales, tan solo la clorita y la mica potásica presentan una distribución significativa en el tramo del acuífero estudiado. Este modelo también prevé para la mayoría de los casos, la precipitación de yeso.

Análisis estadístico

El análisis de conglomerados estadísticos, arroja como resultado la existencia de tres factores que controlan la variabilidad de los parámetros observados (solo de elementos mayores). Uno de esos factores incide en las concentraciones de cloruro, nitrato, litio, boro, potasio y sodio. Los elementos señalados, presentan una anomalía positiva en la región debido a la amplia presencia de salares así como de depósitos salitreros, donde destacan los nitratos sódicos (caliche) así como los nitratos potásicos y otras sales.

En particular, en la zona de estudio, se ubica un depósito salitrero el cual se explotó en la época del auge del caliche, conocida como oficina Lina. Estos depósitos no alcanzan potencias importantes (decenas de metros) tal como registran los sondajes hidrogeológicos mapeados, ubicándose en los primeros metros desde superficie. Pese a que en la zona de estudio no están en contacto con el flujo de agua subterráneo al no alcanzar el nivel freático, es posible que en la zona de recarga la interacción de las aguas caídas con los suelos salinos de la región, durante la infiltración hacia la napa, sea un factor determinante de esta signatura geoquímica rica en nitratos, litio y boro considerando la alta solubilidad de las sales que suelen incorporar a estos elementos en su estructura.

Analizando la distribución espacial de la concentración de nitrato, se observa que los mayores valores (entre 1400 a 3070 mg/l) se registran en los pozos ubicados en el rajo o aguas abajo de este, con excepción de CB-5 el cual pese a ubicarse en la zona noroeste de estudio, también presenta altos valores, mientras que se observan concentraciones entre 13 y 612 mg/l de nitrato, en el sector de Pampa Lina y al norte del rajo.

En estudios sobre las salmueras madres en yacimientos de nitratos, en la región de Antofagasta, se plantea que en la génesis de estas salmueras, han debido intervenir procesos termales así como reciclaje por lixiviación de rocas alteradas y materiales salinos preexistentes. Dado que los nitratos se disponen rellenando fisuras y porosidades, no deben ser considerados verdaderas evaporitas, proceso por el cual resulta efectiva la saturación de salmueras en minerales solubles (Pueyo et al, 1998). Por tanto, es posible que los procesos hipógenos y más tarde supergenos experimen-

tados en este depósito cuprífero, estén relacionados a esta anomalía de contraste positivo en la concentración de nitratos.

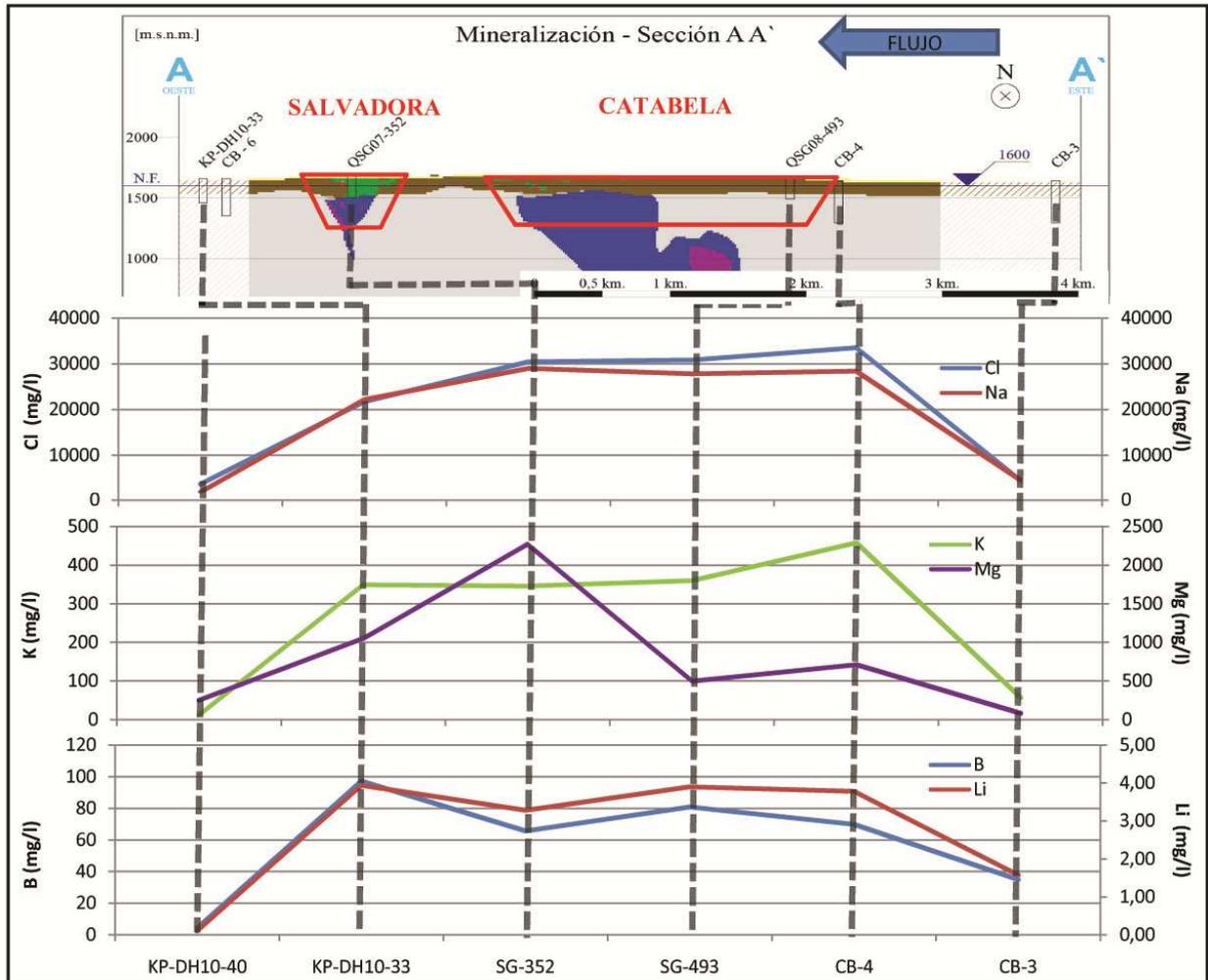


Figura 42. Evolución de concentraciones a lo largo del perfil, en el sentido del flujo: B, Li, K, Na y Cl.

Respecto de la concentración de litio y boro (ver Figura 42), se observa nuevamente que estos elementos presentan una mayor concentración en los pozos ubicados en el depósito mineral así como cercanos a este, respecto de puntos de monitoreo ubicados al sur o al Este del futuro rajo. Cabe destacar que nuevamente CB-5 presenta esta anomalía positiva. Estos elementos se concentran gracias a procesos evaporíticos o de fraccionamiento magmático, quedando en las fases residuales. Por tanto, es consistente con un origen común con el nitrato, sodio y potasio, asociados a sales.

Del análisis de conglomerados estadísticos, se relacionan los parámetros Mg y SO₄. En el contexto geológico en que se enmarca este estudio, una de las causas probables en cuanto a la presencia del ion sulfato en solución, es debido a la disolución de sulfato férrico (FeSO₄) o ácido sulfúrico (H₂SO₄), compuestos resultantes de la oxidación del mineral pirita. Al disolverse dichos compuestos, también se liberan en solución los iones H⁺, Fe(2⁺) y Fe(3⁺). Se observa que la concentración de sulfatos en pozos ubicados en el depósito es de 4 veces la observada en pozos fuera de este (excepto en CB-5), lo cual a su vez coincide con sectores de pH ácido a levemente ácido (4,3 a 6,7). Sin embargo, las mediciones de hierro no son consistentes con este proceso (a no ser que este precipitando como oxi-hidroxidos de Fe), puesto que las concentraciones existentes en el último año, caen por debajo del límite de detección tanto para concentraciones disueltas como totales en los pozos ubicados en el depósito. Además, se debe considerar que el yacimiento presenta una zonación atípica a la de un modelo de enriquecimiento secundario en un stock de cobre, puesto que la baja relación pirita/calcopirita no permitió movilizar sustancialmente el cobre en solución, observándose en la mayoría de los casos una oxidación in situ. Sin embargo, la fuente cuantitativamente más importante de sulfato a las aguas subterráneas es la disolución de yeso y anhidrita, los cuales se presentan ampliamente rellenando fracturas así como presentes en los suelos salinos. Esta idea es sustentada por los resultados obtenidos tras el cálculo del índice de saturación, donde se observa que en el pozo CB-4 estaría precipitando yeso mientras que en el resto de puntos contenidos en el perfil estudiado, el yeso y/o la anhidrita son fases minerales que se encuentran en equilibrio con el sistema. Pese a lo anterior, se observa en la Figura 43, que este proceso por si solo no explica las concentraciones de sulfato, ya que la correlación entre el ion calcio y sulfato, tiene un buen índice (0,68) sólo para los pozos ubicados en el extremo norte y sur (SG-403 y CB-10, respectivamente). Para los pozos ubicados al Este, este factor es de 0,01; en el rajo es de 0,06; al Oeste es de 0,37; y CB-9 tiene una relación de 0,008.

La liberación del sulfato podría estar asociado con procesos de disolución de minerales sulfatados como alunita, brocantita o antlerita, los cuales son interceptados por el nivel freático, encontrándose saturados.

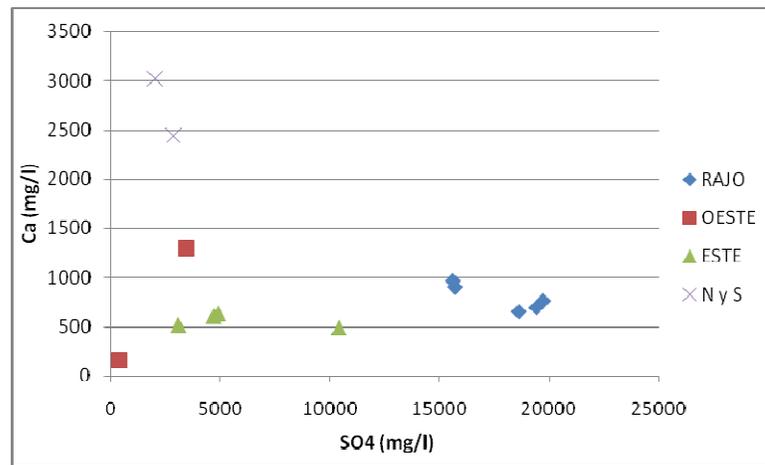


Figura 43. Sulfato versus calcio, campaña agosto 2013.

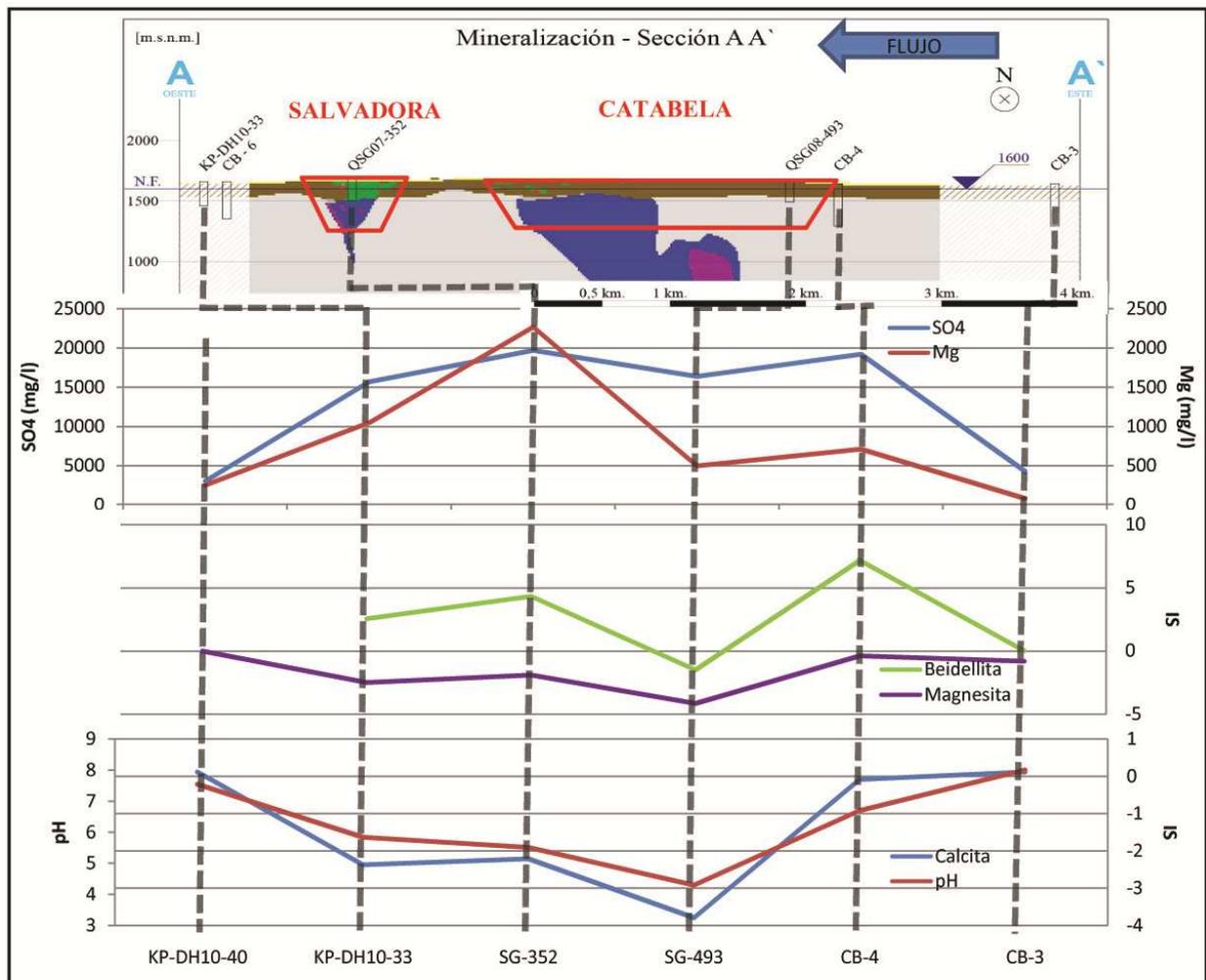


Figura 44. Evolución de concentraciones a lo largo del perfil, en el sentido del flujo: SO4 y Mg.

Se observan las máximas concentraciones de Mg en SG-352 donde existe alteración clorítica y argílica, así como dolomita asociada a las brechas presentes en la zona. Este es un sector fuertemente alterado, donde se observa una capa bien desarrollada de óxidos de cobre. Entre SG-493 y SG-352, el flujo de agua pasa por un sector altamente lixiviado bajo el cual se deposita un volumen importante de sulfuros de cobre. Por tanto, la evolución del magnesio observado a lo largo de la línea de flujo, responde probablemente a procesos de alteración de silicatos ferro magnesianos que tuvieron lugar posiblemente durante los procesos supergenos experimentados por el yacimiento, donde se liberó en solución al Mg.

Una fase que contiene Mg y se presenta ampliamente en el acuífero, es la beidellita, arcilla del grupo de la esmectitas asociada a la alteración clorítica. Cálculos en el índice de saturación, la muestran en desequilibrio con el acuífero mientras que los resultados del modelo inverso, la sitúan como una fase responsable de variaciones observadas en la evolución de la línea de flujo, en particular en la zona mineralizada, donde se interpreta transferencia de moles que indican disolución. Esta fase se presenta junto al yeso, pudiendo entre ambos explicar las variaciones observadas de magnesio y sulfato. Otras fases que involucran las simulaciones inversas, son la clorita y flogopita, minerales que contienen Mg en su estructura.

El tercer conglomerado estadístico identificado en los dendogramas, agrupa las variables Ca y Sr. Considerando que ambos elementos tienen un radio iónico similar, es común que el Sr reemplace al Ca en la estructura de los minerales. Por lo que si el agua respecto a una fase mineral que contiene Ca no está en equilibrio, está podría experimentar procesos de disolución que liberen Sr, allí donde este elemento se encuentre en sustitución iónica del Ca. Sin embargo, no es la única fuente para movilizar Sr en solución, ya que tal como se observa en la Figura 45, la relación entre Ca y Sr no es estrecha.

Los resultados del IS muestran en equilibrio a la celestita, sulfato de estroncio, en los pozos CB-3, CB-4, SG-493 mientras que para los pozos restantes en la línea de flujo, se encuentra con un IS negativo, es decir, de estar presente en el acuífero, debe estar experimentando disolución, lo cual es consistente con las menores concentraciones de estroncio registradas en esos pozos.

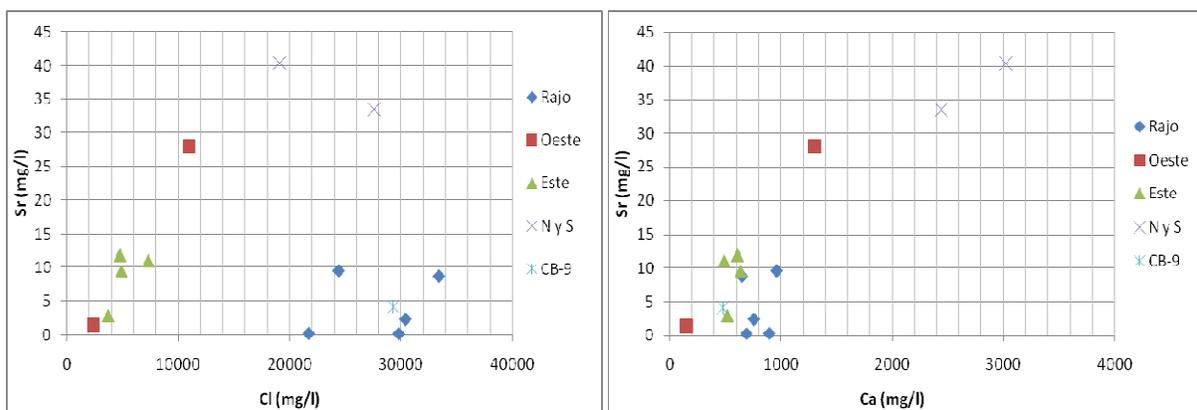


Figura 45. Concentración de Sr versus Ca y Cl, monitoreo agosto 2013 y noviembre 2012.

En la Figura 45 se observa que en el sector Oeste y N-S, existe una estrecha relación entre el sulfato y el calcio, lo cual se puede vincular a procesos de disolución de yeso. Es en el sector N-S donde se registran las mayores concentraciones de Sr, lo cual se puede relacionar a fenómenos de sustitución iónica de Sr por Ca en la estructura del yeso (gracias a que tienen un radio iónico similar). En el resto de la zona de estudio, no se observan mayores diferencias en las concentraciones de Sr. El calcio si presenta mayores valores en la zona mineralizada.

En la Figura 46 se observa que las variaciones de calcio a lo largo de la línea de flujo, se acoplan bastante bien con las variaciones experimentadas por el IS del agua respecto al yeso. También se observa que el sulfato muestra una variabilidad asociada al comportamiento del IS de la alunita y en menor medida, al IS de brocantita y antlerita. Posiblemente por este motivo, no se observa una correlación estrecha entre Ca y SO₄ (ver Figura 43), ya que el SO₄ presenta múltiples fuentes. Por lo tanto, se puede establecer que la variabilidad de Ca y Sr está relacionada con la capacidad del agua para disolver/precipitar yeso.

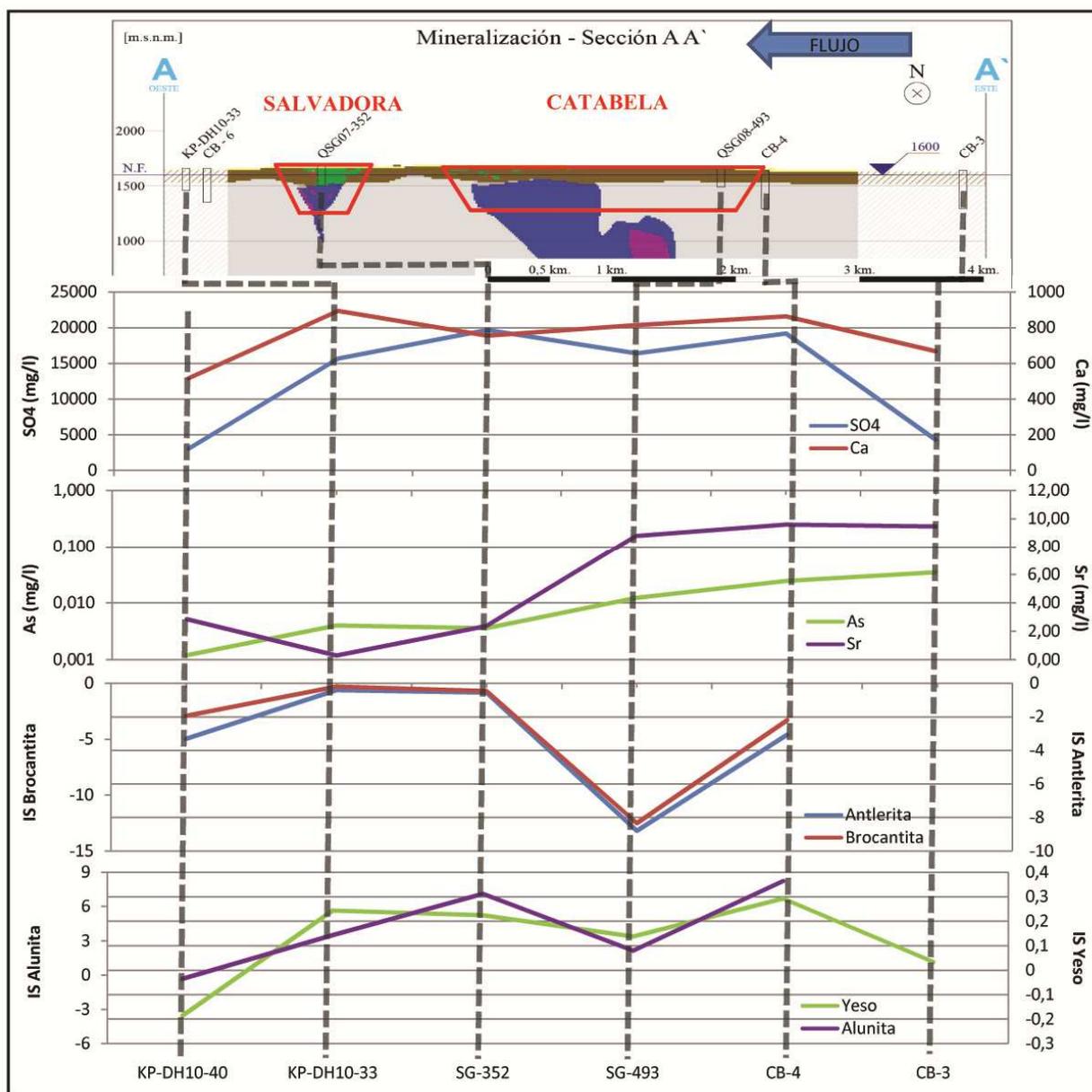


Figura 46. Evolución de concentraciones a lo largo del perfil, en el sentido del flujo: Ca y Sr.

CB-5 tiene un comportamiento similar al de los pozos ubicados en sectores mineralizados, en cuanto a concentraciones de TDS, pH, nitratos, Li, Cu, entre otros parámetros. Lo destacable de esto, es que este punto de monitoreo se dispone al noroeste de los futuros rajos, ubicándose aguas arriba de la dirección del flujo, por tanto, se descarta que sea resultado de un transporte de metales desde el sector mineralizado ya identificado. Dado que escapa a los alcances de este estudio,

no se profundiza en el análisis de una posible relación entre la química observada en este punto de monitoreo con la presencia de relaves a unos 2 km al noroeste de este punto, en el sector de Cerro Dominador. Allí se disponen 5 relaves, de los cuales tres se encuentran totalmente secos, los cuales fueron depositados en el año 90 sin ninguna medida para contener infiltraciones al subsuelo. Por tanto, para plantear un posible vector de exploración para el negocio minero, orientado hacia la geología de subsuelo ubicada en torno a CB-5, se debe evaluar la relación de este punto con los relaves, ya que la química observada podría ser consecuencia de una posible pluma de contaminación de metales desde Cerro Dominador. Esta idea se podría desestimar a priori, considerando las bajas permeabilidades de la zona de estudio, lo cual significa muy bajas velocidades para el flujo de agua subterránea, haciendo factible un escenario de neutralización de cualquier avance de una pluma metálica desde cerro Dominador hacia el sur (dirección del gradiente hidráulico).

Índices de saturación y simulación inversa

Las fases en el rango establecido como equilibrio, se repiten en la mayoría de los pozos encontrando como denominador común el yeso, anhidrita, calcita y dolomita. Estos minerales también se observan como relleno en las vetas, vetillas y fracturas identificadas en las campañas de sondajes geotécnicos, geológicos e hidrogeológicos. Por tanto, este resultado es consistente con la conceptualización del flujo, a través de la porosidad secundaria ofrecida por estructuras.

Anhidrita está en equilibrio en todos los pozos excepto KP-DH10-40, donde se encuentra subsaturado. Este pozo se ubica alejado de la zona mineralizada, donde esta fase se presenta principalmente en fracturas y vetillas, lugar por el cual circula el agua. Es posible que se deba a que el agua no ha estado en contacto lo suficiente con el mineral, como para que la reacción de disolución alcance el equilibrio o también se puede deber a que este mineral no tenga una presencia importante en el sector. Se debe observar que entre las fechas estudiadas para este pozo, el IS aumenta, es decir, entre mayo 2011 y agosto 2012, ha ocurrido disolución de anhidrita (de SI -0,43 a SI -0,40).

Se observa en pozo CB-4 que el agua está sobresaturada respecto de la fase Leonardita, el cual se usa como aditivo en perforación. También se calcula sobresaturación de esta fase en SG-352, así como en KP-DH10-33 y KP-DH10-40 al inicio del monitoreo, en mayo 2011. Considerando que

estos resultados son obtenidos en los primeros muestreos tras la habilitación de estos pozos, es posible que esta fase sea resultado de los aditivos.

Respecto de los resultados para aguas sobresaturadas respecto de fases minerales, se observa una consistencia a lo largo de la línea de flujo, con minerales pertenecientes a asociaciones minerales características de alteraciones hidrotermales por las cuales atraviesa el flujo. Es el caso del desequilibrio observado con la beidellita (esmectita) y wairakita (ceolita), presentes en la alteración cloritica; también la alunita, caolinita y pirofilita, las cuales son fases de alteración argílica (Corbett y Leach, 1988). Aguas se mantienen sobresaturadas respecto al cuarzo ya que este es cinéticamente no reactivo a bajas temperaturas (Drever, 1982).

En general, se observa una consistencia entre las fases minerales termodinámicamente estables con el acuífero, en cada punto de monitoreo, con los datos de mineralogía presente obtenidos tras mapeo geológico de los testigos de puntos de observación. Esto confirma la hipótesis de equilibrio termodinámico y fisicoquímico entre las aguas subterráneas y su medio hospedante.

Dado que el sistema de aguas subterráneas aquí estudiado se encuentra bien caracterizado en cuanto a química, mineralogía e hidrología, resulta adecuada una aproximación inversa de especiación y balance de masa, permitiendo de manera directa establecer cuantitativamente modelos de reacción geoquímica. Por tanto, dado que se cuenta con suficiente información, la única limitación de este ejercicio son restricciones termodinámicas.

Se debe tener claro que el planteamiento implícito en un modelo inverso es que dos aguas para las que existen datos químicos, están en una línea de flujo y por tanto, el agua gradiente abajo tiene una composición derivada del agua inicial (gradiente arriba) y afectada por la actuación de reacciones químicas. Este planteamiento es válido si se cumplen dos condiciones: 1) que las aguas estén realmente conectadas por una misma vía de flujo y 2) que exista un estado estacionario con respecto al flujo y al quimismo en el sistema. Se utilizan tres restricciones en los cálculos realizados por el modelo: ecuación de conservación de electrones; balance de cargas; masa constante de aguas. La limitación mayor está en que este tipo de cálculos, no están restringidos termodinámicamente y por tanto, el modelador ha de decidir sobre la viabilidad termodinámica de los modelos de reacción propuestos por estas simulaciones (Gimeno et al, 1994).

En cuanto a la evolución química de las aguas a lo largo de la línea de flujo, se observa en los resultados del modelo inverso que de los tres escenarios planteados, uno de ellos resulta posible,

evaluando esto en función de las fracciones relativas utilizadas por las simulaciones. La hipótesis de una conexión hidráulica entre el punto CB-3 y CB-4, requiere que se concentren a lo largo de 1,5 km de recorrido, tres veces las concentraciones elementales presentes en CB-3. Mientras que el segundo escenario, donde las aguas evolucionan a partir de CB-4, se observan fracciones relativas en torno a 1 para todos los tramos, excepto el pozo KP-DH10-40. El tercer escenario, busca evaluar la posibilidad de que la química resultante sea producto de la evolución de las aguas CB-3 y CB-4 por separado, es decir, que si bien no exista una conexión entre CB-3 y CB-4, pero que conectada por el sistema de fallas conjugado presentes en la zona, las aguas de Pampa Lina logren conectarse con el sector del proyecto, aportando su configuración inicial a la evolución del sistema, desde SG-493. Este último escenario, genera muy pocas soluciones que contemplen mezcla entre ambas aguas, observándose que en las simulaciones que incluyen a ambos pozos, la fracción relativa de CB-4 es del orden de 3 a 4 veces mayor que la de CB-3.

Respecto del pozo KP-DH10-40, se observa que los resultados de modelos inversos utilizan una fracción relativa muy baja del agua inicial (del orden de 0,06) para todos los escenarios, por lo que es posible que estas aguas sean el resultado de la evolución química de un flujo de agua en una traza distinta de la aquí analizada.

Por lo expuesto, el escenario más factible, es que el tramo CB-4 a KP-DH10-33 este conectado por una misma línea de flujo. De este análisis, se desprende que es posible una desconexión entre CB-3 y CB-4, debido al sistema estructural que separa ambos puntos.

Dado que se obtuvieron miles de resultados de las simulaciones inversas para cada tramo, se discuten aquellas fases comunes o recurrentes, presentes en todos los modelos, por lo que se analizan los resultados desde una perspectiva cualitativa más que cuantitativa. Esto último, debido a que no tiene sentido cuantificar la transferencia de moles estimada para cada fase siendo que se cuentan con múltiples escenarios que asignan distintos valores.

Se observa que en el tramo CB-4 y SG-493 la calcita se diluye mientras que la hematita precipita. Otras fases en desequilibrio son la flogopita, pirita, yeso, goethita y clorita.

Para el tramo CB-4 y SG-352, se calcula en todos los modelos que la calcita precipita, así como las fases recurrentes goethita, yeso y clorita, mientras que la hematita se diluye. La precipitación de goethita puede ser un mecanismo por el cual se capte arsénico, dadas las propiedades coloidales de esta fase, ya que genera un coloide positivo que puede adsorber aniones complejos como

oxianiones de arsénico. Esto explicaría el comportamiento del arsénico en el tramo SG-493 a KP-DH10-33.

En el tramo CB-4 a KP-DH10-33, la única fase que aparece considerada en todos los resultados, es la calcita, la cual estaría precipitando, mientras que otras fases recurrentes son el yeso y la brocantita, las que estarían disolviéndose así como la hematita que estaría precipitando. También aparecen las fases atacamita, goethita, clorita, flogopita y calcopirita en desequilibrio.

Entre CB-4 y KP-DH10-40, se identifican tres fases comunes a todos los resultados, encontrándose en disolución las fases atacamita, calcita y beidellita, siendo esta última, una fase que también se presenta en otros resultados precipitando. También se presenta con frecuencia el yeso, el que siempre está en disolución, así como la goethita, la cual está tanto en precipitación como disolución.

Del proceso de modelación inversa se concluye que las fases que inciden en las variaciones químicas observadas en la línea de flujo son: calcita, hematita, flogopita, pirita, yeso, goethita, clorita, brocantita, atacamita, calcopirita y beidellita. Estas fases modifican las concentraciones de Fe, SO₄, Cu, Al, Mg, Ca, Cl, K, C y Si. Claramente, estos resultados no modelan todo el sistema, pero son las mínimas fases que se pueden estimar termodinámicamente, y que cumplen con el criterio de balance de masa, en las condiciones fisicoquímicas del sistema.

Respecto de la evolución de las aguas en la línea de flujo, contrastada con los resultados de índice de saturación se relaciona que el manganeso disminuye sus concentraciones en SG-493, para luego alcanzar su mayor valor en la línea de flujo, en SG-352. Este comportamiento descendente en las concentraciones en el tramo CB-4 a SG-493, es consistente con procesos de precipitación de óxidos de Mn como Pirolusita, Nsutita y Birnesita, las cuales son fases minerales sobresaturadas en SG-493. El aumento en las concentraciones en SG-352, puede estar asociado a la disolución de rodocrosita.

Boro y litio, muestran un comportamiento acoplado a lo largo de la línea de flujo, donde no se observa una influencia significativa del tramo comprendido por la zona mineralizada.

Se observa una alta variabilidad en la concentración de molibdeno, elemento que no cumple con el criterio de reproducibilidad establecido respecto de los duplicados de terreno. El incremento en sus concentraciones en el pozo SG-352 puede estar relacionado a la relación existente entre la

mineralización de molibdeno y la alteración potásica, la cual caracteriza fuertemente a la litología del sector. De todos modos, las variaciones observadas son de un orden de magnitud muy baja, las que se encuentran acentuadas por la escala logarítmica en la cual se presentan los resultados en el gráfico de Mo.

El Zn y Hg aumentan sostenidamente a lo largo de la línea de flujo, para luego caer varios órdenes de magnitud en KP-DH10-40, lo cual podría indicar que no están participando activamente en procesos de precipitación o adsorción. Fe y Al, muestran un comportamiento similar a lo largo de la línea de flujo. La precipitación de anita, es un escenario planteado en el modelo inverso, en el tramo CB-4 y SG-493, lo cual podría explicar el descenso en las concentraciones de Fe y Al.

El estroncio y el arsénico muestran un comportamiento tendente a disminuir sus concentraciones a medida que interactúan con el sector mineralizado. A su vez, se observa que en los pozos SG-352 y KP-DH10-33 existen las condiciones termodinámicas para que precipiten arcillas, la cual es una fase que puede incluir en su estructura a estos elementos.

Se observa un aumento en el contenido de cobre a medida que las aguas interactúan con el yacimiento, alcanzando su máximo registro en el pozo SG-352, donde el nivel freático intercepta el sector mineralizado con cobre de mediana y alta solubilidad. Si bien en el mapeo del sondaje en el pozo KP-DH10-33, se registra la presencia de mineralización de cobre, esta no significa un volumen importante en la roca por lo que no figura en los mapas ni perfiles de mineralización, ubicándose aguas abajo de los rajos proyectados. Por tanto, es posible que la concentración de cobre registrada en este punto, responda a procesos de transporte de este metal más que a la disolución de cobre in situ, teniendo en cuenta que la principal especie de este metal es un complejo clorurado, el cual es bastante móvil en las condiciones fisicoquímicas del sector. Sin embargo, este complejo pierde movilidad, precipitando el metal en el tramo restante, ya que en KP-DH10-40 se observan concentraciones 1140 veces menores que las registradas en KP-DH10-33.

Una partícula coloidal dispersa puede adsorber partículas con carga eléctrica en su superficie. Si un coloide con una carga entra en contacto con otro coloide o ion de carga opuesta, por lo general, estas partículas coloidales precipitan y se separan del medio dispersante. Dado su pequeño tamaño, el área superficial con respecto a su masa, es muy grande, predominando fenómenos de superficie. Tal es el caso de la mezcla de coloides como el de hidróxido de hierro (III), partícula coloidal de carga positiva, y el de sulfuro de arsénico (III), de carga negativa (Seese y Daub,

2005). Por tanto, la importancia de estudiar el comportamiento de los elementos antes y después del filtrado, en cuanto a concentraciones, radica en que elementos que se movilizan principalmente como cationes, podrían ser removidos del agua por las partículas en suspensión. Se observa una gran variabilidad de los datos, respecto del filtrado de la muestra, para los elementos Zn, Co, Pb, Cu, Cs, Ba, Mn, Si, Ce, Pr, Fe y Al, encontrándose en la fase sólida más que en la disuelta. Este comportamiento podría ser resultado de fenómenos de adsorción con material suspendido

12. Conclusiones

- Las aguas subterráneas del Proyecto Sierra Gorda se clasifican de acuerdo al diagrama Piper en:
 - Aguas cloruradas y sulfatadas, sódicas, las cuales se caracterizan por tener como catión principal el Na y como aniones principales Cl y SO₄.
 - Aguas sulfatadas magnésicas, correspondiente a las aguas monitoreadas en el pozo CB-9, donde se observa como catión principal el Mg.
- Graficando los datos químicos en un diagrama Durov, se observa en general una alta concentración de sólidos totales disueltos (TDS), los cuales presentan sus máximos valores en los sectores de los futuros rajes. El acuífero presenta aguas saladas a salobres, registrándose incluso salmueras en algunas campañas de monitoreo. El pH varía de neutro a ácido. Las aguas subterráneas monitoreadas al interior del Proyecto Sierra Gorda, por ejemplo los puntos QSG08-493 y QSG07-352, ubicados en el interior de los rajes proyectados, presentan un pH ácido, lo cual es consistente con fenómenos de oxidación de sulfuros en la zona mineralizada.
- Puntos de muestreo con moderada distancia a las zonas mineralizadas, por ejemplo QSG08-402 y CB-10, presentan concentraciones de magnesio y calcio elevadas en comparación de los puntos de muestreo ubicadas en las zonas de mineralización.
- En el sector de Pampa Lina, los pozos CB-2, CB-3 y SGCSG06-237 presentan concentraciones de TDS considerablemente más bajas que la mayoría de los puntos de muestreo aquí estudiados. En particular las concentraciones de cloruro se encuentran considerablemente más bajas que el resto de la zona estudiada, mientras los valores de pH se presentan más altos, indicando aguas neutrales a alcalinas.
- Considerando que el principal flujo del agua subterránea tiene una dirección Este a Oeste, se observa en la figura de distribución espacial de diagramas Stiff la evolución de las aguas al interactuar con la zona mineralizada (representada por los contornos del futuro rajo) así como la existencia de sectores con un comportamiento hidroquímico distinto en función de los tipos de alteración y mineralización predominantes.

- Análisis estadístico, de Dendogramas, permiten identificar tres principales componentes que agrupan la variabilidad de los elementos mayores en las aguas subterráneas. Se concluye que la fuente responsable de la mayor variabilidad en los datos, es la disolución de sales, incidiendo en la concentración de Li, B, Cl, K, NO₃ y Na, las cuales presentan una amplia distribución en la zona de estudio. Un segundo factor de variabilidad, responsable de la variación de Ca y Sr en el perfil estudiado, es posiblemente la capacidad del agua para disolver o precipitar yeso. Finalmente, el tercer componente, que controla la concentración de Mg y SO₄, está relacionado con la capacidad del agua para disolver o precipitar yeso, antlerita, brocantita, alunita, beidellita, clorita y sulfuros.
- En varios pozos recién perforados (2013), se observa una gradual estabilización de las concentraciones de los elementos y parámetros físico-químicos. Esto se debe al control de la baja permeabilidad del macizo rocoso al sistema agua subterránea, impidiendo un rápido intercambio de las aguas después de la perforación. Se concluye que la química exhibida por los pozos CB-6 y CB-7 está en desequilibrio con el acuífero, pese a observarse una tendencia a equilibrarse con el medio.
- La gran mayoría de los pozos excede la norma de calidad de agua subterránea (NCh 1.333) debido al entorno mineralizado de las aguas. Esta condición se genera de forma natural, ya que aún no interviene en el sector la actividad minera asociada al proyecto Sierra Gorda.
- Los gráficos de concentraciones versus tiempo para la gran mayoría de los puntos de muestreo presentan un comportamiento relativamente estable con leves a moderadas fluctuaciones durante los periodos de registros, con excepción de la observación descrita en el párrafo anterior.
- Las variaciones y dispersiones observadas en las concentraciones de los metales minoritarios y trazas Zn, Co, Pb, Cu, Cs, Ba, Mn, Si, Ce, Pr, Fe y Al, se explica por un fuerte control de su movilidad, cuya estabilidad depende del pH y Eh del sistema de aguas subterráneas así como a procesos de adsorción en material suspendido, formación de oxihidroxidos y coloides.
- En general, se observa una consistencia entre las fases minerales termodinámicamente estables con el acuífero, en cada punto de monitoreo, con los datos de mineralogía presente

obtenidos tras mapeo geológico de los testigos de puntos de observación. Esto confirma la hipótesis de equilibrio termodinámico entre las aguas subterráneas y su medio hospedante.

- Los modelos inversos muestran que existe una baja posibilidad de que las aguas observadas en CB-3 evolucionen, tras procesos de interacción agua-roca, a composiciones similares a las observadas en el pozo CB-4. Diagramas Stiff, Piper, Durov, gráficos de elementos mayores versus Cl, así como análisis estadístico de conglomerados, separan las características de los pozos de Pampa Lina respecto de los puntos ubicados al Oeste del sistema de fallas N-S, que limita la zona del rajo con Pampa Lina. Sumado al comportamiento hidrológico del nivel freático así como el gradiente hidráulico, que separa el flujo de ambos sectores, se concluye que existe una desconexión del flujo subterráneo entre ambos sectores debido a la estructura N-S paralelo al límite entre Pampa Lina y el área del Proyecto, que actúa como una barrera.
- Del proceso de modelación inversa se concluye que las fases que inciden en las variaciones químicas observadas en la línea de flujo son: calcita, hematita, flogopita, pirita, yeso, goethita, clorita, brocantita, atacamita, calcopirita y beidellita. Estas fases modifican las concentraciones de Fe, SO₄, Cu, Al, Mg, Ca, Cl, K, C y Si. Claramente, estos resultados no modelan todo el sistema, pero son las mínimas fases que se pueden estimar termodinámicamente, y que cumplen con el criterio de balance de masa, en las condiciones fisicoquímicas del sistema.

Bibliografía

Apodaca, L.E., Jeffrey, B.B., Michelle, C.S., 2002. Water quality in shallow alluvial aquifers, Upper Colorado River Basin, Colorado, 1997. *J. Am. Water Res. Assoc.* 38 (1), pág. 133–143.

Cervetto, M., 2012. Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de las cuencas: Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar El Laco, II Región de Chile. Tesis para optar al título de geóloga.

Dirección General de Aguas (DGA), 2012. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero de Sierra Gorda.

Dold, B., 2003. Aguas ácidas: formación, predicción, control y prevención. *Revista Minería*.

García, T., García, M., 2004. Estudio y aplicación de modelos acoplados de flujo y transporte de aguas subterráneas, *Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*, Volumen I, año 2004.

Gimeno, M y Peña, J., 1994. Principios básicos de la modelización geoquímica directa e inversa. *Estudios geológicos*, 50: páginas 359-367.

Guía climatológica practica [en línea]
<http://www.mapasdechile.com/clima_region02/index.htm> [consulta: Diciembre 2013]

Leybourne, M., Cameron, E., 2008. Source, transport, and fate of rhenium, selenium, molybdenum, arsenic, and copper in ground water associated with porphyry–Cu deposits, Atacama Desert, Chile. *Chemical Geology* 247, pág. 208–228

Leybourne, M., Cameron, E., 2006. Composition of groundwaters associated with porphyry-Cu deposits, Atacama Desert, Chile: Elemental and isotopic constraints on water sources and water–rock reactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, página 1616–1635.

Negrete, E., Quezada, C., Ruttger, D., 2014. Actualización modelo hidrogeológico, proyecto Sierra Gorda. VAIGS.

Pueyo J., Chong G. y Vega M., 1998. Mineralogía y evolución de las salmueras madres en el yacimiento de nitratos Pedro de Valdivia, Antofagasta, Chile. *Revista geológica de Chile* v.25 n.1.

Ristorcelli, S., Stanley, C. R., y Lawie, D., 2007. Average Relative Error in Geochemical Determinations: Clarification, Calculation, and a Plea for Consistency. *Exploration and Mining Geology*, Vol. 16, N. 3-4, p. 265-274.

Ristorcelli, S., Ronning, P., Fahey, P y Lustig, G., 2008. Updated technical report on the Sierra Gorda project, Region II, Chile. Preparado para Quadra mining LTD. p. 44-60.

Schlumberger Water Services (SWS), 2010. Caracterización hidrogeológica proyecto Sierra Gorda. Estudio de impacto ambiental, proyecto Sierra Gorda de minera Quadra Chile Ltda.

Seese W. y Daub, W., 2005. Química. Pearson Educación.

Sharif, M.U., Davis, R.K., Steele, K.F., Kim, B., Kresse, T.M., Fazio, J.A., 2008. Inverse geochemical modeling of ground water evolution with emphasis on arsenic in the Mississippi River Valley alluvial aquifer, Arkansas (USA). *J. Hydrol.* 350, pág. 41–55.

Sillitoe, R. y McKee, E., 1996. Age of Supergene Oxidation and Enrichment in the Chilean Porphyry Copper Province. *Economic Geology*, Vol. 91, p. 164 - 179.

Soto, C., 2010. Hidrogeología e Hidrogeoquímica de aguas subterráneas en el distrito Inca de Oro, Región de Atacama: procesos de interacción agua-roca y dispersión geoquímica. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias mención Geología y memoria para optar al título de geóloga.

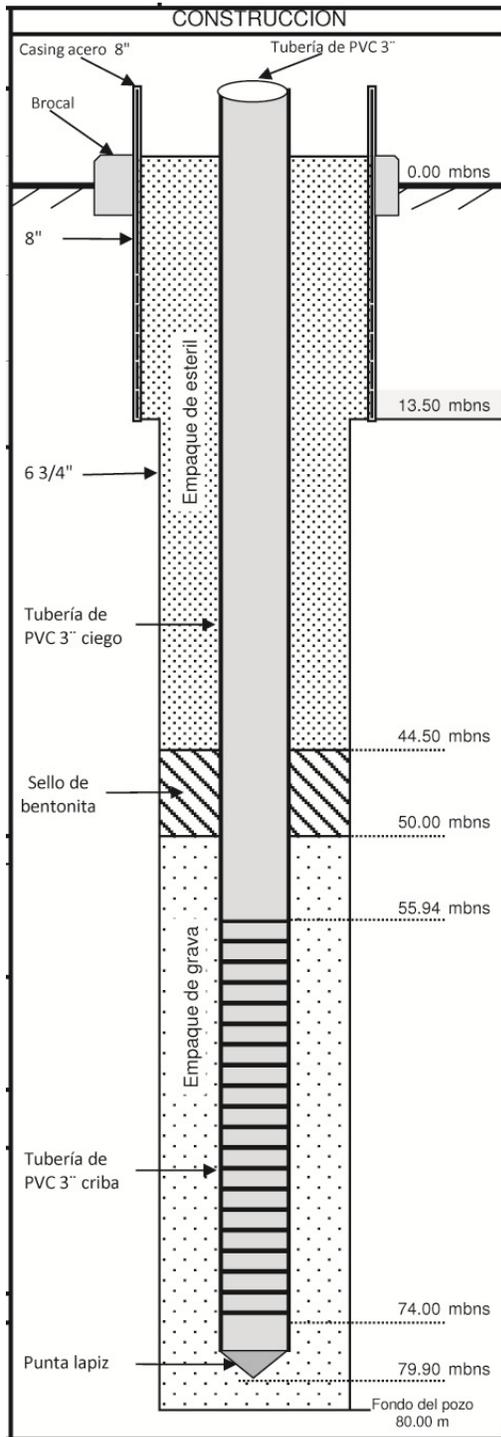
User guide to PHREEQC, 07 may 1996, USGS [en línea] <http://wwwbr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc.v1/html/phqc_62.htm> [consulta: 6 Febrero 2013]

Ward, R.; Robinson, M., 2000. Principles of hydrology, Mc Graw Hill, Fourth edition, London.

Anexos

Anexo 1. Características de puntos de muestreo

Anexo 1.1: (izq.) Figura esquemática de construcción de pozo de monitoreo tipo Casagrande (ejemplo de pozo CB-5). (der.) Tabla sobre ubicación, desde superficie, del inicio de la sección ranurada en los pozos habilitados tipo Casagrande. No se cuenta con información de pozos KP.



Ubicación de sección ranurada	
Pozo	Metros bajo superficie (mbs)
CB-1	80,9
CB-2	26,48
CB-3	27,88
CB-4	38,55
CB-5	55,94
CB-6	231,6
CB-7	100,96
CB-8	109,2
CB-9	92,8
CB-10	134,43
CB-11	100,04
CB-12	25,98

Anexo 2. Análisis de laboratorio

Anexo 2.1 Límites de detección ICP-MS ACTLABS (60 elementos).

Elemento	Límite de detección	Elemento	Límite de detección
Ag	0.2 µg/L	Mn	0.1 µg/L
Al	2 µg/L	Mo	0.1 µg/L
As	0.03 µg/L	Na	5 µg/L
B	3 µg/L	Nb	0.005 µg/L
Ba	0.1 µg/L	Nd	0.001 µg/L
Be	0.1 µg/L	Ni	0.3 µg/L
Bi	0.3 µg/L	Pb	0.01 µg/L
Ca	700 µg/L	Pr	0.001 µg/L
Cd	0.01 µg/L	Rb	0.005 µg/L
Ce	0.001 µg/L	Sb	0.01 µg/L
Co	0.005 µg/L	Sc	1 µg/L
Cr	0.5 µg/L	Se	0.2 µg/L
Cs	0.001 µg/L	Si	200 µg/L
Cu	0.2 µg/L	Sm	0.001 µg/L
Dy	0.001 µg/L	Sn	0.1 µg/L
Er	0.001 µg/L	Sr	0.04 µg/L
Eu	0.001 µg/L	Ta	0.001 µg/L
Fe	10 µg/L	Tb	0.001 µg/L
Ga	0.01 µg/L	Te	0.1 µg/L
Gd	0.001 µg/L	Th	0.001 µg/L
Ge	0.01 µg/L	Ti	0.1 µg/L
Hf	0.001 µg/L	Tl	0.001 µg/L
Hg	0.2 µg/L	Tm	0.001 µg/L
Ho	0.001 µg/L	U	0.001 µg/L
In	0.001 µg/L	V	0.1 µg/L
K	30 µg/L	W	0.02 µg/L
La	0.001 µg/L	Y	0.003 µg/L
Li	1 µg/L	Yb	0.001 µg/L
Lu	0.001 µg/L	Zn	0.5 µg/L
Mg	2 µg/L	Zr	0.01 µg/L

Anexo 2.2 Límites de detección ICP-OES ACTLABS.

Elemento	Límite de detección
Ca	0.1 mg/L
K	0.1 mg/L
Li	0.05 mg/L
Mg	0.1 mg/L
Na	0.1 mg/L
Sr	10 µg/L
Zn	5 µg/L

Anexo 2.3 Límites de detección cromatógrafo iónico DIONEX DX-120, ACTLABS.

Elemento	Límite de detección
F	0.01 mg/L
Br	0.03 mg/L
Cl	0.03 mg/L
NO ₂ (as N)	0.01 mg/L
NO ₃ (as N)	0.01 mg/L
PO ₄ (as P)	0.02 mg/L
SO ₄	0.03 mg/L

Anexo 2.4 Límites de detección método gravimétrico y de conductancia, ACTLABS.

Parámetro	Límite de detección
TDS	0.01 mg/L
TSS	4 mg/L

Anexo 2.5 Límites de detección de Hg por método "Cold Vapour FIMS", ACTLABS.

Elemento	Límite de detección
Hg	30 ng/L
Hg	6 ng/L

Anexo 3. Control de calidad

Anexo 3.1 Promedio de DRA muestras sin filtrar, en duplicados de laboratorio y de terreno (DRA de toda la base de datos y DRA desde 2011 a 2013). En amarillo DRA>30%.

Elemento	Dup. Terreno		Dup. Lab.
	Prom. DRA	Prom. DRA 11-13	Prom. DRA 11-13
Ag	18,68	18,68	4,33
Al	27,49	24,8	3,96
As	11,5	7,25	5,65
Au	10,12	15,03	9,64
B	11,17	16,29	2,78
Ba	12,93	12,74	3,29
Be	10,26	30,77	4,65
Bi			
Br	12,68	10	
Ca	7,9	10,55	1,66
Cd	10,09	13,33	3,9
Ce	24,54	32,28	6,01
Cl	2,51	2,11	
Co	13,31	21,52	3,23
Cr	3,5	3,5	29,08
Cs	6,87	7,01	4,21
Cu	14,02	20,34	4,2
Dy	20,62	27,09	13,91
Er	8,96	10,21	4,88
Eu	7,06	6,96	11,23
F			
Fe	22,22	37,23	5,5
Ga	34,37	63,81	7,31
Gd	15,24	18,58	18,79
Ge	7,54	9,45	7,59
Hf	18,58	22,99	14,33
Hg	21,28	22,46	9,42
Ho	6,97	6,85	14,82
I	42,2	0,44	6,99
In	11,54		0
K	8,33	9,27	4,37
La	15,27	19,25	9,04
Li	8,21	10,78	2,17
Lu	8,52	8,18	14,48
Mg	7,94	6,26	2,26
Mn	7,11	7,62	3,35
Mo	15,22	5,04	7,46
Na	7,52	4,69	3,85

Elemento	Dup. Terreno		Dup. Lab.
	Prom. DRA	Prom. DRA 11-13	Prom. DRA 11-13
Nb	12,39	12,39	50,94
Nd	16,58	20,39	4,99
Ni	29,39	18,52	13,74
NO2			
NO3	4,46	4,99	
Os			
P	6,14		
Pb	13,87	12,94	6,27
Pd	45,08	28,57	
PO4	3,33		
Pr	21,89	27,93	4,45
Pt			
Rb	6,01	6,14	4,14
Re	5,36	6,67	2,49
Ru	10,85		
Sb	31,26	31,26	17,6
Sc	4,75	9,5	6,06
Se	39,43	17,13	6,8
Si	8,15	9,55	4,03
Sm	18,56	24,15	7,42
Sn			0
SO4	2,7	1,97	
Sr	6,41	6,67	2,41
Ta	5,35	8,7	3,7
Tb	8,04	8,54	7,18
Te	22,2	22,2	28,57
Th	9,22	0,8	38,38
Ti	19,6	19,23	6,59
Tl	8,53	9,82	4,36
Tm	7,7	7,25	11,4
U	5,75	6,12	3,27
V	27,56	27,56	50,58
W	47,6	51,4	5,38
Y	9,07	10,3	6,64
Yb	17,4	21,93	23,45
Zn	8,11	9,16	4,66
Zr	20,61	6,57	7,04

Anexo 3.2 Promedio de DRA muestras filtradas, en duplicados de laboratorio y de terreno (DRA de toda la base de datos y DRA desde 2011 a 2013).

Elemento	Dup. Terreno		Dup. Lab.
	Prom. DRA	Prom. DRA 11-13	Prom. DRA 11-13
Ag	48,32	59,52	7,71
Al	33,71	30,98	12,51
As	27,59	29,33	3,61
Au	7,78	4,94	12,81
B	8,80	12,27	3,38
Ba	15,42	15,95	2,56
Be	25,20	20,41	7,41
Bi			<1.d.
Br	4,79	11,97	2,51
Ca	5,91	8,08	4,42
Cd	21,42	38,46	6,33
Ce	21,53	31,56	6,74
Cl	2,51	2,11	3,09
Co	18,93	27,97	8,18
Cr	16,10	16,1	45,79
Cs	16,76	21,55	1,74
Cu	9,78	20,19	10,6
Dy	37,95	53,87	40,63
Er	24,94	37,39	5,59
Eu	13,05	19,62	10,14
F			1,51
Fe	23,94	46,84	25,18
Ga	20,69	28,39	2,88
Gd	22,61	31,98	3,87
Ge	20,74	27,72	6,62
Hf	27,52	37,52	28,71
Hg	18,86	20,27	8,52
Ho	10,64	16,77	27,28
I	4,45	0,32	6,51
In	38,99		0
K	4,99	5,08	3,62
La	33,07	45,62	4,4
Li	9,10	10,88	4,58
Lu	13,04	20,92	35,45
Mg	4,99	5,48	3,4
Mn	6,34	6,69	3,09
Mo	28,82	24,35	8,23
Na	7,84	5,46	5,73

Elemento	Dup. Terreno		Dup. Lab.
	Prom. DRA	Prom. DRA 11-13	Prom. DRA 11-13
Nb	83,80	83,8	13,17
Nd	30,70	42,25	13,58
Ni	27,14	35,84	11,65
NO2			1,02
NO3	4,46	4,99	1,5
Os			<1.d.
P	29,51		7,98
Pb	13,52	13,47	76,19
Pd	83,33	83,33	
PO4	3,33		3,66
Pr	11,40	14,12	2,85
Pt			<1.d.
Rb	13,69	17,26	2,23
Re	6,21	7,07	1,5
Ru	35,88		<1.d.
Sb	31,60	31,6	12,52
Sc	15,38		8,73
Se	24,50	32,47	6,87
Si	8,38	11,53	3,05
Sm	28,92	47,63	22,04
Sn			0
SO4	2,70	1,97	1,9
Sr	7,98	11,21	3,42
Ta	34,68	33,33	11,92
Tb	11,60	17,05	6,45
Te			12,34
Th	15,68		82,88
Ti	30,68	35,58	7,56
Tl	14,94	19,47	3,49
Tm	12,83	20,28	23,97
U	7,10	7,6	4,52
V	18,47	18,47	5,57
W	8,70	8,7	4,04
Y	32,81	44,19	11,89
Yb	30,72	43,11	25,81
Zn	7,60	11,44	7,73
Zr	27,14	19,73	17,63

Anexo 3.3 Muestras sobre el límite de detección para datos filtrados (concentraciones disueltas), para un total de 170 muestras para cada elemento.

Elemento	Unidad	N° de muestras > L.D.	% de muestras > L.D.	>80% > L.D.
Ag	µg/L	74	43,53	
Al	µg/L	85	50	
As	µg/L	103	60,59	
Au	µg/L	52	30,59	
B	µg/L	165	97,06	B
Ba	µg/L	145	85,29	Ba
Be	µg/L	7	4,12	
Bi	µg/L	0	0	
Br	mg/L	49	28,82	
Ca	mg/L	168	98,82	Ca
Cd	µg/L	141	82,94	Cd
Ce	µg/L	127	74,71	
Cl	mg/L	169	99,41	Cl
Co	µg/L	128	75,29	
Cr	µg/L	36	21,18	
Cs	µg/L	141	82,94	Cs
Cu	µg/L	141	82,94	Cu
Dy	µg/L	112	65,88	
Er	µg/L	108	63,53	
Eu	µg/L	78	45,88	
F	mg/L	38	22,35	
Fe	µg/L	77	45,29	
Ga	µg/L	87	51,18	
Gd	µg/L	112	65,88	
Ge	µg/L	127	74,71	
Hf	µg/L	66	38,82	
Hg	µg/L	34	20	
Hg_Fims	ng/L	90	52,94	
Ho	µg/L	93	54,71	
I	µg/L	52	30,59	
In	µg/L	10	5,88	
K	mg/L	162	95,29	K
La	µg/L	124	72,94	
Li	mg/L	161	94,71	Li
Lu	µg/L	67	39,41	
Mg	mg/L	168	98,82	Mg
Mn	µg/L	157	92,35	Mn
Mo	µg/L	127	74,71	

Elemento	Unidad	N° de muestras > L.D.	% de muestras > L.D.	>80% > L.D.
Na	mg/L	169	99,41	Na
Nb	µg/L	41	24,12	
Nd	µg/L	126	74,12	
Ni	µg/L	140	82,35	Ni
NO2	mg/L	23	13,53	
NO3	mg/L	161	94,71	NO3
Os	µg/L	0	0	
P	µg/L	3	1,76	
Pb	µg/L	133	78,24	Pb
Pd	µg/L	33	19,41	
PO4	mg/L	19	11,18	
Pr	µg/L	102	60	
Pt	µg/L	0	0	
Rb	µg/L	139	81,76	Rb
Re	µg/L	57	33,53	
Ru	µg/L	15	8,82	
Sb	µg/L	93	54,71	
Sc	µg/L	23	13,53	
Se	µg/L	129	75,88	Se
Si	µg/L	143	84,12	Si
Sm	µg/L	108	63,53	
Sn	µg/L	14	8,24	
SO4	mg/L	170	100	SO4
Sr	µg/L	161	94,71	Sr
Ta	µg/L	35	20,59	
Tb	µg/L	83	48,82	
Te	µg/L	15	8,82	
Th	µg/L	45	26,47	
Ti	µg/L	128	75,29	
Tl	µg/L	122	71,76	
Tm	µg/L	65	38,24	
U	µg/L	146	85,88	U
V	µg/L	37	21,76	
W	µg/L	54	31,76	
Y	µg/L	135	79,41	Y
Yb	µg/L	104	61,18	
Zn	µg/L	157	92,35	Zn
Zr	µg/L	87	51,18	

Anexo 3.4 Muestras sobre el límite de detección para datos sin filtrar (concentraciones totales), para un total de 170 muestras para cada elemento.

Elemento	Unidad	N° de muestras > L.D.	% de muestras > L.D.	>80% > L.D.
Ag	µg/L	81	47,65	
Al	µg/L	154	90,59	Al
As	µg/L	93	54,71	
Au	µg/L	54	31,76	
B	µg/L	165	97,06	B
Ba	µg/L	139	81,76	Ba
Be	µg/L	11	6,47	
Bi	µg/L	0	0	
Br	mg/L	57	33,53	
Ca	mg/L	169	99,41	Ca
Cd	µg/L	153	90	Cd
Ce	µg/L	141	82,94	Ce
Cl	mg/L			
Co	µg/L	154	90,59	Co
Cr	µg/L	54	31,76	
Cs	µg/L	145	85,29	Cs
Cu	µg/L	162	95,29	Cu
Dy	µg/L	141	82,94	Dy
Er	µg/L	132	77,65	
Eu	µg/L	110	64,71	
F	mg/L			
Fe	µg/L	145	85,29	Fe
Ga	µg/L	103	60,59	
Gd	µg/L	138	81,18	Gd
Ge	µg/L	139	81,76	Ge
Hf	µg/L	94	55,29	
Hg	µg/L	39	22,94	
Hg_Fims	ng/L	100	58,82	
Ho	µg/L	109	64,12	
I	µg/L	56	32,94	
In	µg/L	13	7,65	
K	mg/L	164	96,47	K
La	µg/L	140	82,35	La
Li	mg/L	166	97,65	Li
Lu	µg/L	81	47,65	
Mg	mg/L	170	100	Mg
Mn	µg/L	169	99,41	Mn
Mo	µg/L	126	74,12	

Elemento	Unidad	N° de muestras > L.D.	% de muestras > L.D.	>80% > L.D.
Na	mg/L	170	100	Na
Nb	µg/L	62	36,47	
Nd	µg/L	141	82,94	Nd
Ni	µg/L	146	85,88	Ni
NO2	mg/L	23	13,53	
NO3	mg/L			
Os	µg/L	0	0	
P	µg/L	10	5,88	
Pb	µg/L	142	83,53	Pb
Pd	µg/L	37	21,76	
PO4	mg/L		11,18	
Pr	µg/L	136	80	Pr
Pt	µg/L	0	0	
Rb	µg/L	145	85,29	Rb
Re	µg/L	57	33,53	
Ru	µg/L	6	3,53	
Sb	µg/L	86	50,59	
Sc	µg/L	18	10,59	
Se	µg/L	138	81,18	Se
Si	µg/L	152	89,41	Si
Sm	µg/L	134	78,82	
Sn	µg/L	13	7,65	
SO4	mg/L			
Sr	µg/L	160	94,12	Sr
Ta	µg/L	35	20,59	
Tb	µg/L	111	65,29	
Te	µg/L	11	6,47	
Th	µg/L	98	57,65	
Ti	µg/L	153	90	Ti
Tl	µg/L	121	71,18	
Tm	µg/L	82	48,24	
U	µg/L	149	87,65	U
V	µg/L	46	27,06	
W	µg/L	60	35,29	
Y	µg/L	141	82,94	Y
Yb	µg/L	127	74,71	
Zn	µg/L	165	97,06	Zn
Zr	µg/L	110	64,71	

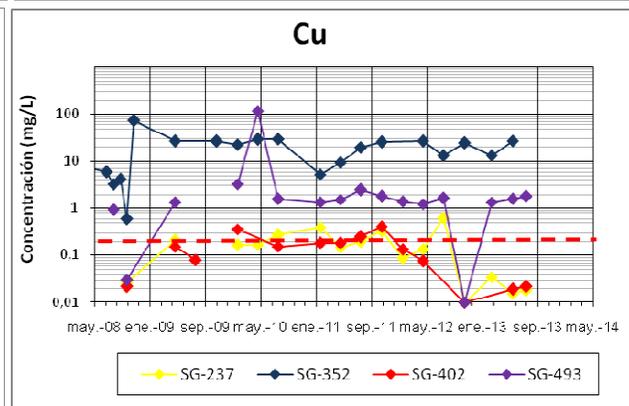
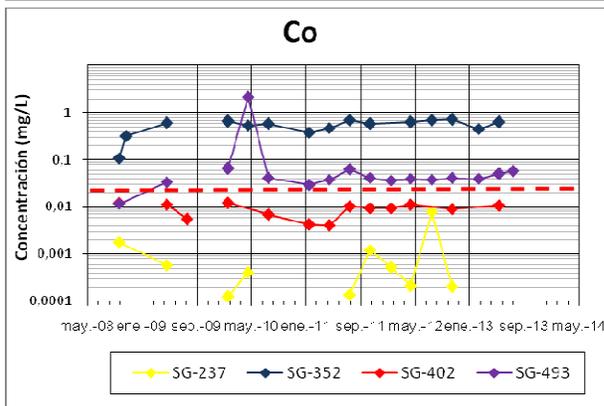
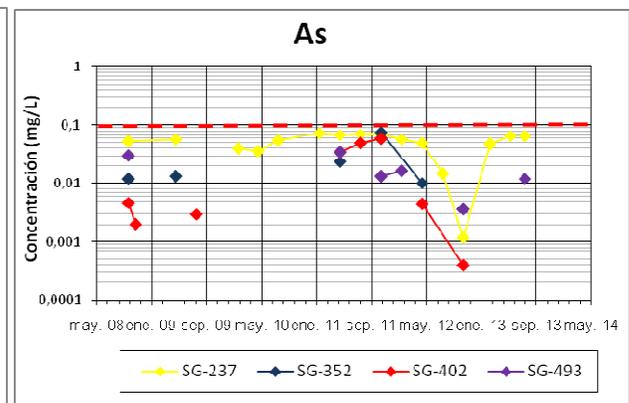
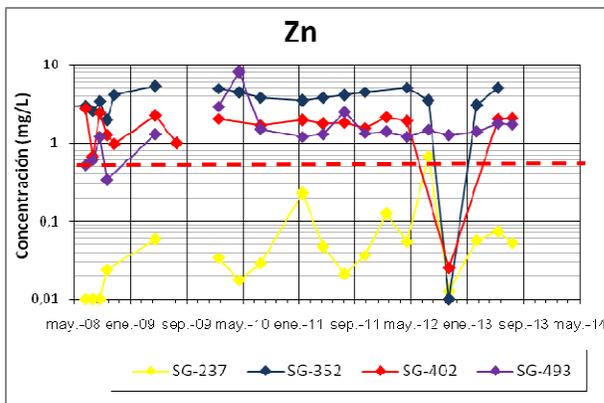
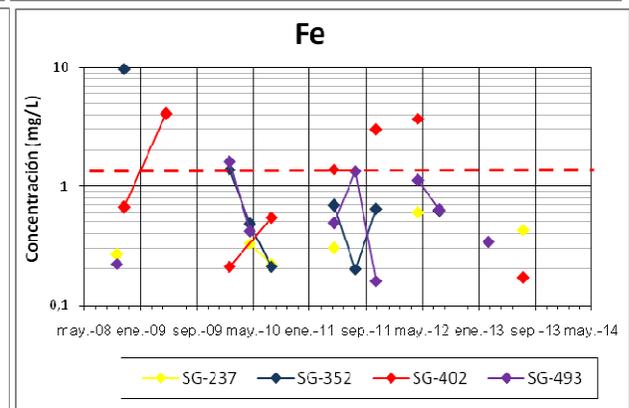
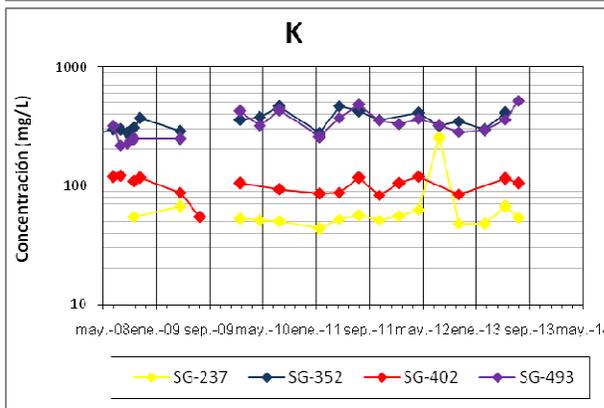
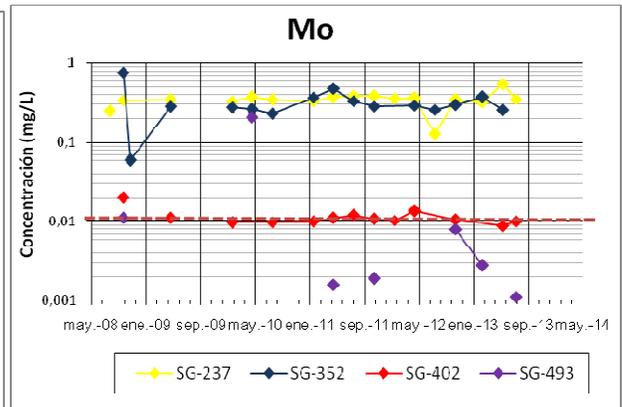
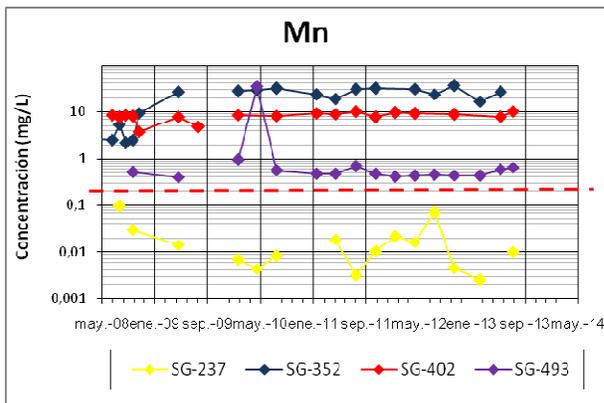
Anexo 3.5 Resultado análisis de laboratorio de muestras en blanco, colectadas en terreno, años 2011 a 2012.

Parámetro	Fecha	May-11	Nov-11	Ago-12	Nov-12
	Unidad/Muestra	PL- 105 UA	SG-515- UA	PE- 615 - UA	SG7711112
Cl	mg/L	0,22	0,41	16,20	12,50
HCO3	mg/L				
NO3	mg/L	<0,01	<0,01	<2	0,15
SO4	mg/L	<0,03	0,35	<6	3,34
Ca	mg/L	<0,1	<0,1	<1	<1
K	mg/L	<0,6	<0,6	<0,06	<0,06
Mg	mg/L	<0,02	0,135	0,064	0,09
Na	mg/L		0,746	0,699	0,85
Fe	mg/L	<0,2	<0,2	0,04	0,09
Li	mg/L	<0,02	<0,02	<0,002	<0,002
Ag	mg/L	<0,004	<0,004	<0,0004	<0,0004
Al	mg/L	<0,04	0,078	0,027	0,07
As	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,00006	<0,00006
B	mg/L	0,101	0,14	0,325	0,28
Ba	mg/L	<0,002	0,0021	0,0224	<0,0002
Be	mg/L	<0,002	<0,002	<0,0002	<0,0002
Bi	mg/L	<0,006	<0,006	<0,0006	<0,0006
Cd	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,00002	<0,00002
Co	mg/L	<0,0001	0,000116	0,000038	0,00
Cr	mg/L	0,0116	<0,010	<0,001	<0,001
Cu	mg/L	0,0055	0,0052	0,0006	0,0082
Mn	mg/L	<0,002	<0,002	0,001	0,0054
Mo	mg/L	<0,002	<0,002	<0,0002	0,00
Ni	mg/L	<0,006	<0,006	<0,0006	<0,0006
Pb	mg/L	<0,0002	0,0009	0,00006	0,00
Sb	mg/L	<0,0002	<0,0002	0,00002	<0,00002
Se	mg/L	<0,004	<0,004	<0,0004	<0,0004
Si	mg/L	<4	<4	6,8	9,20
Sn	mg/L	<0,002	<0,002	<0,0002	<0,0002
Sr	mg/L	<0,0008	0,00206	0,00137	0,00491
Ti	mg/L	<0,002	<0,002	0,003	0,01
Tl	mg/L	<0,00002	<0,00002	<0,000002	<0,000002
V	mg/L	0,004	<0,002	<0,0002	<0,0002
Zn	mg/L	<0,010	0,0211	0,0292	0,02
Hg	mg/L	<0,004	<0,004	<0,0004	<0,0004

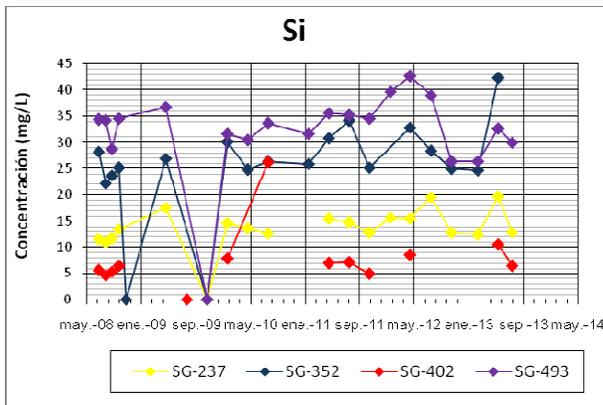
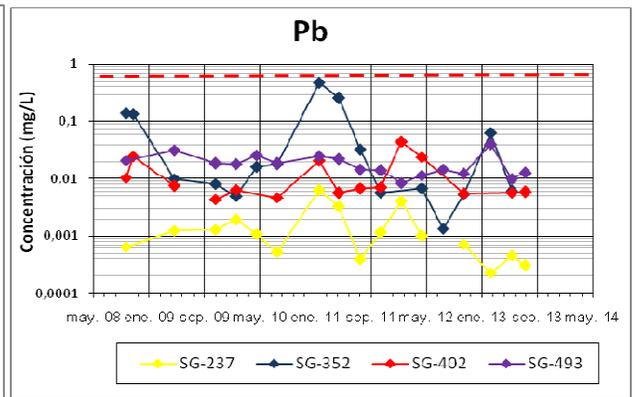
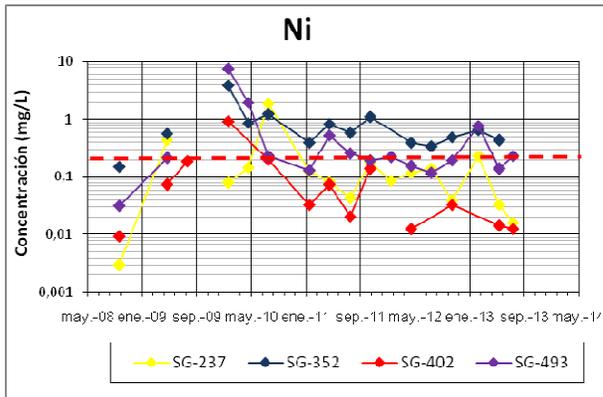
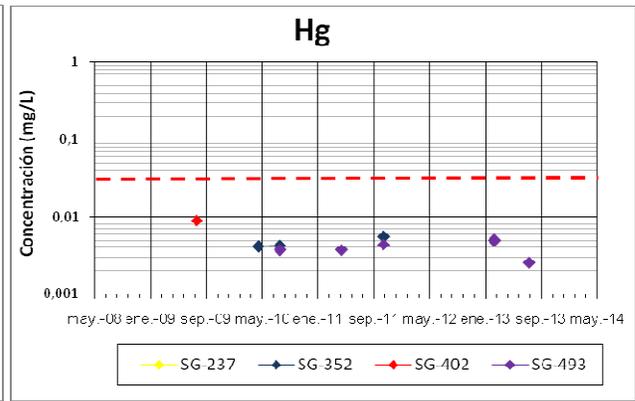
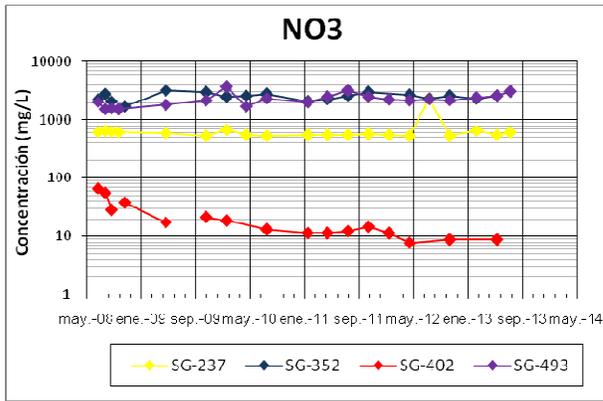
Anexo 3.6 Resultado análisis de laboratorio de muestras en blanco, colectadas en terreno, año 2013.

Parámetro	Fecha	Feb-13	Feb-13	May-13	Ago-13
	Unidad/Muestra	F-043-UA	F-013-UA	SG-0513-20	SG-0813-33
Cl	mg/L	1,08	0,39	6,41	0,17
HCO3	mg/L				1
NO3	mg/L	< 0,3	0,01	0,35	< 0,01
SO4	mg/L	< 0,7	0,18	12,90	0,15
Ca	mg/L	<1	<1	<1	< 1
K	mg/L	<0,06	0,14	<0,06	< 0,06
Mg	mg/L	0,09	0,328	0,082	0,082
Na	mg/L	0,645	3,36	0,725	0,715
Fe	mg/L	< 0,02	0,04	0,03	0,03
Li	mg/L	0,003	0,01	<0,002	< 0,002
Ag	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	< 0,0004
Al	mg/L	< 0,004	< 0,004	0,01	0,009
As	mg/L	< 0,00006	< 0,00006	0,00247	< 0,00006
B	mg/L	0,159	0,114	0,167	0,472
Ba	mg/L	0,0014	<0,0002	0,0031	0,0029
Be	mg/L	< 0,0002	< 0,0002	<0,0002	< 0,0002
Bi	mg/L	< 0,0006	< 0,0006	<0,0006	< 0,0006
Cd	mg/L	<0,00002	0,00005	<0,00002	< 0,00002
Co	mg/L	0,000028	0,000052	0,000024	0,000013
Cr	mg/L	< 0,001	< 0,001	<0,001	< 0,001
Cu	mg/L	0,0017	0,0023	0,003	0,001
Mn	mg/L	0,0014	0,002	0,0008	0,0006
Mo	mg/L	0,0002	<0,0002	<0,0002	< 0,0002
Ni	mg/L	<0,0006	<0,0006	0,0012	< 0,0006
Pb	mg/L	0,00009	< 0,00002	0,00104	< 0,00002
Sb	mg/L	<0,00002	0,00044	0,00008	< 0,00002
Se	mg/L	<0,0004	<0,0004	0,0318	< 0,0004
Si	mg/L	1	1,1	0,8	< 0,4
Sn	mg/L	< 0,0002	< 0,0002	0,0004	<0,0002
Sr	mg/L	0,00249	0,0195	0,00135	0,00187
Ti	mg/L	< 0,0002	0,0011	0,0024	0,0008
Tl	mg/L	< 0,000002	< 0,000002	<0,000002	< 0,000002
V	mg/L	< 0,0002	< 0,0002	<0,0002	< 0,0002
Zn	mg/L	0,197	0,209	0,14	0,0083
Hg	mg/L	0,000008	< 0,000006	<0,0004	< 0,0004

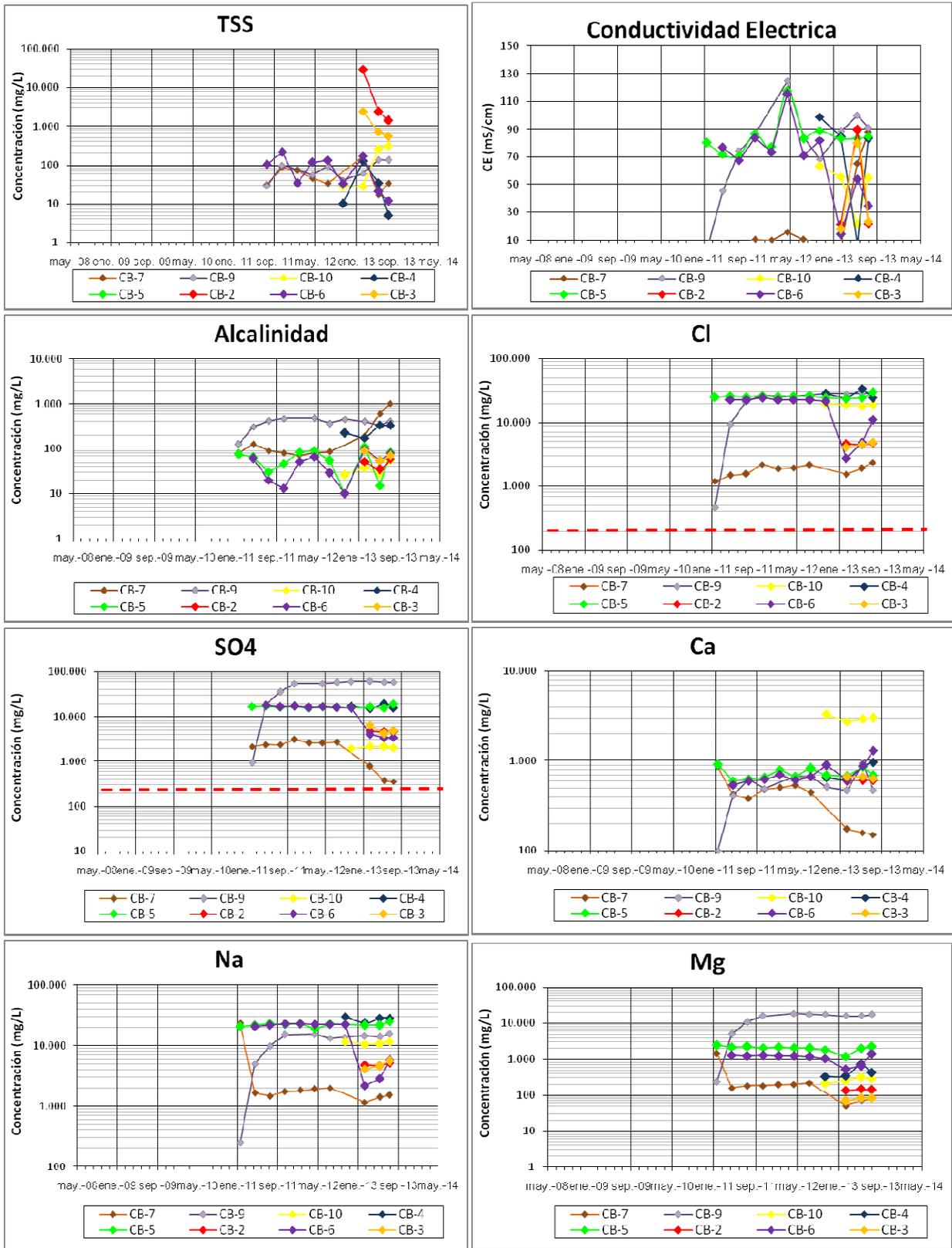
Anexo 4.2 Evolución temporal pozos históricos: Mn, Mo, K, Fe, Zn, As, Co y Cu.



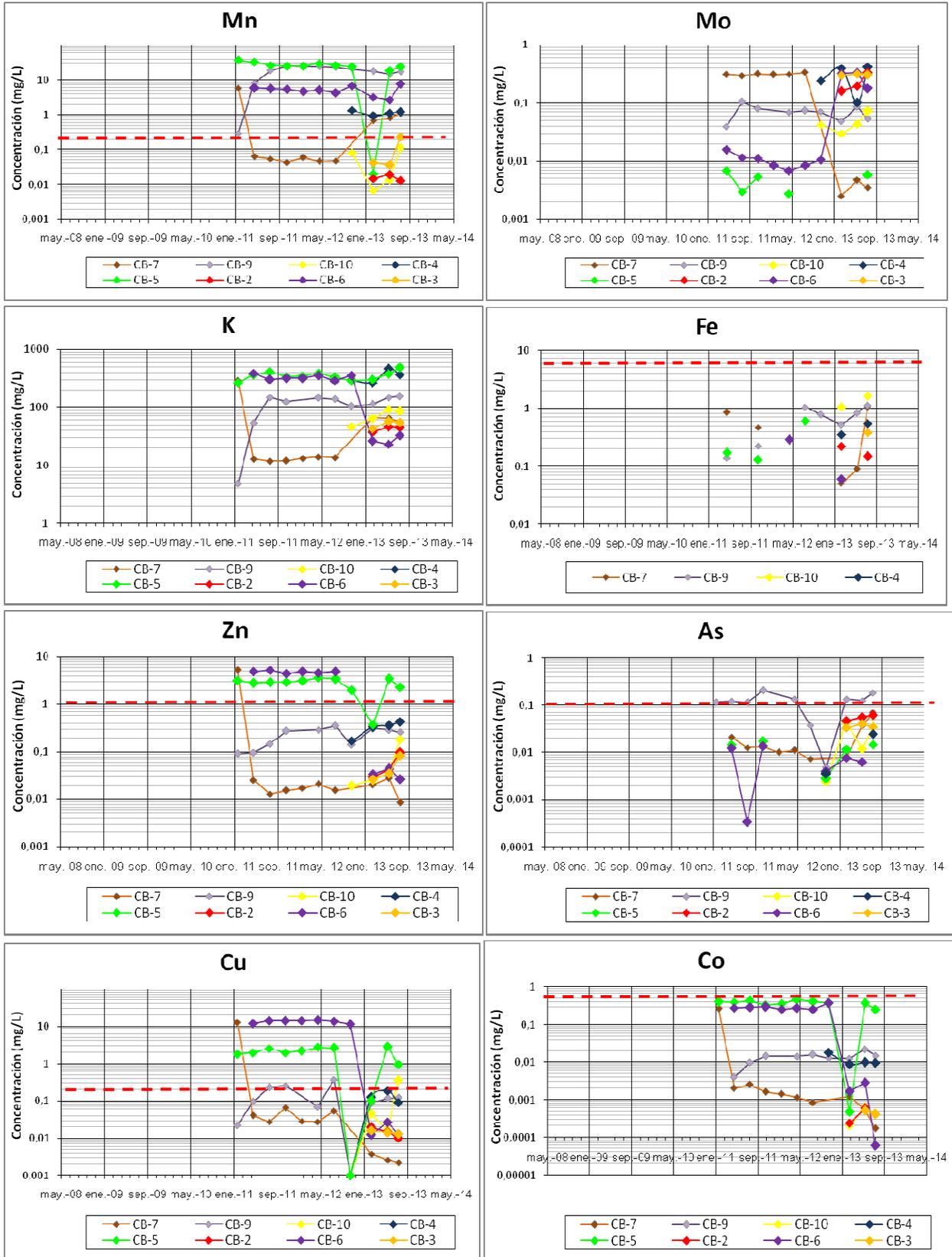
Anexo 4.3 Evolución temporal pozos históricos: NO₃, Hg, Ni, Pb, Si.



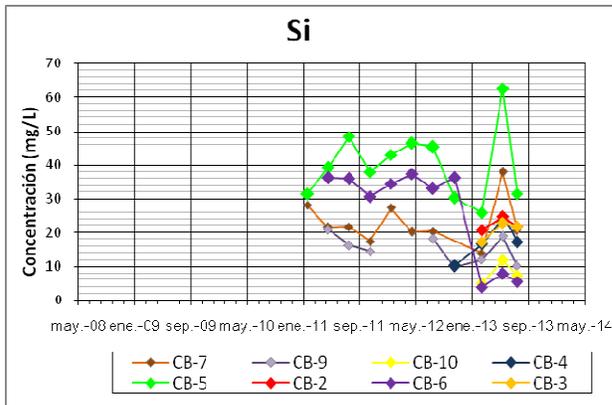
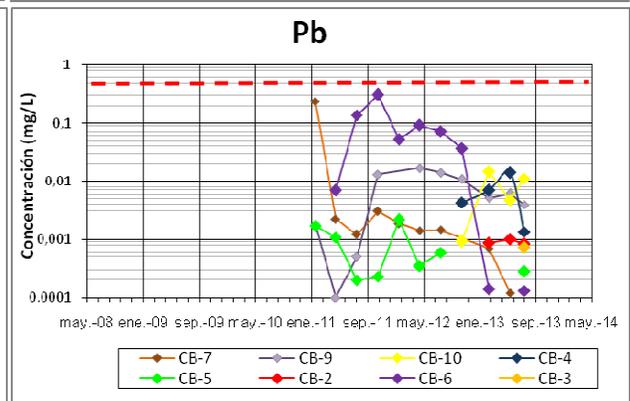
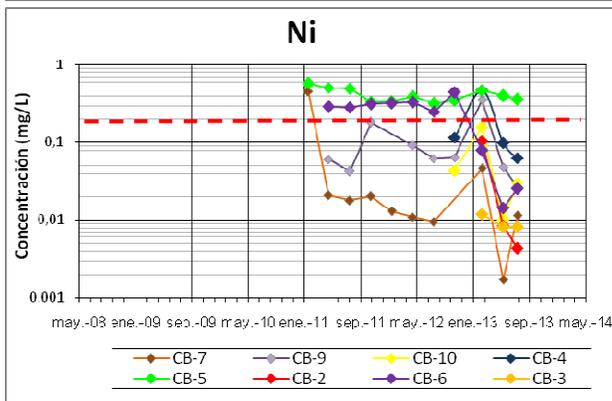
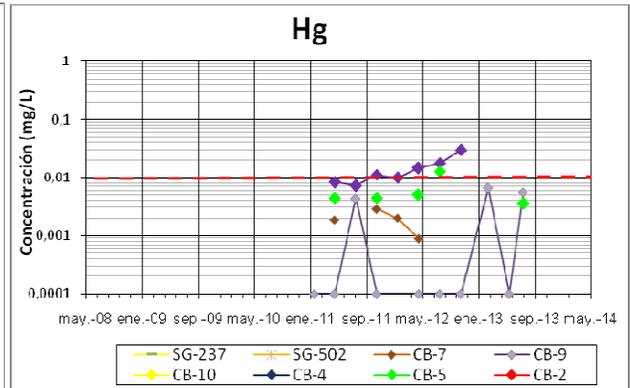
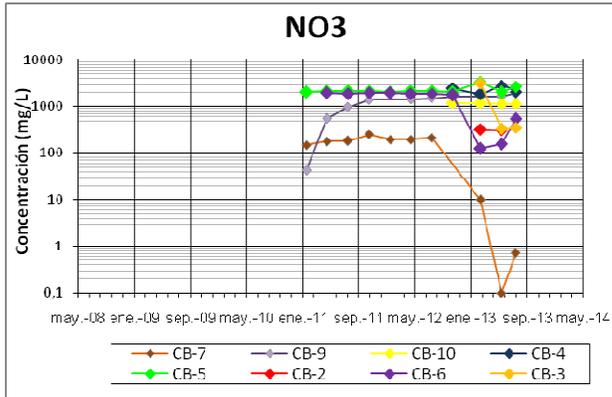
Anexo 4.4 Evolución temporal pozos CB: TSS, CE, Alcalinidad, Cl, SO4, Ca, Na y Mg.



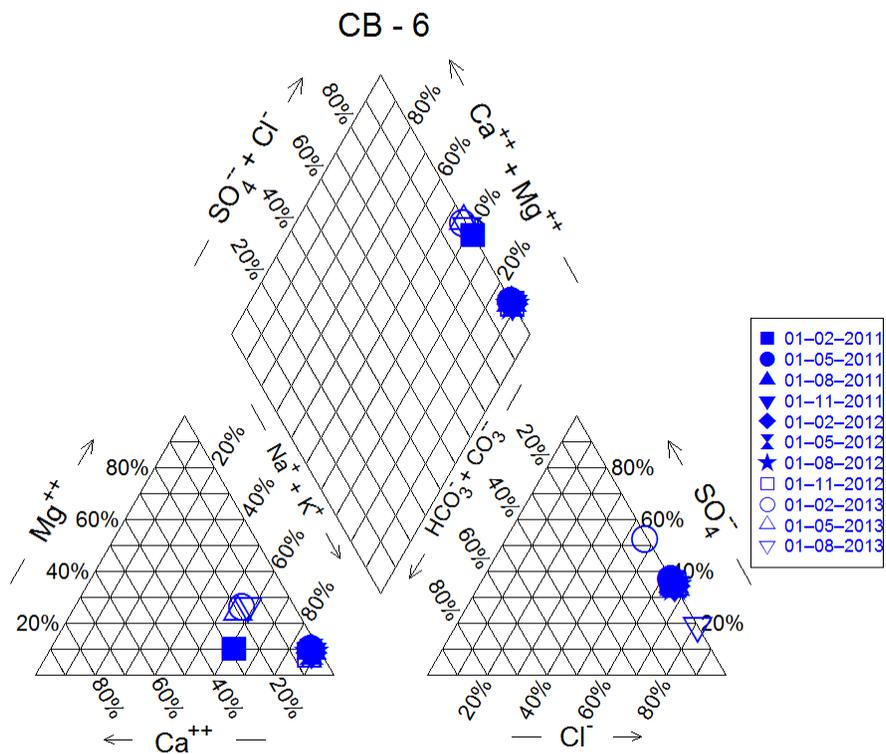
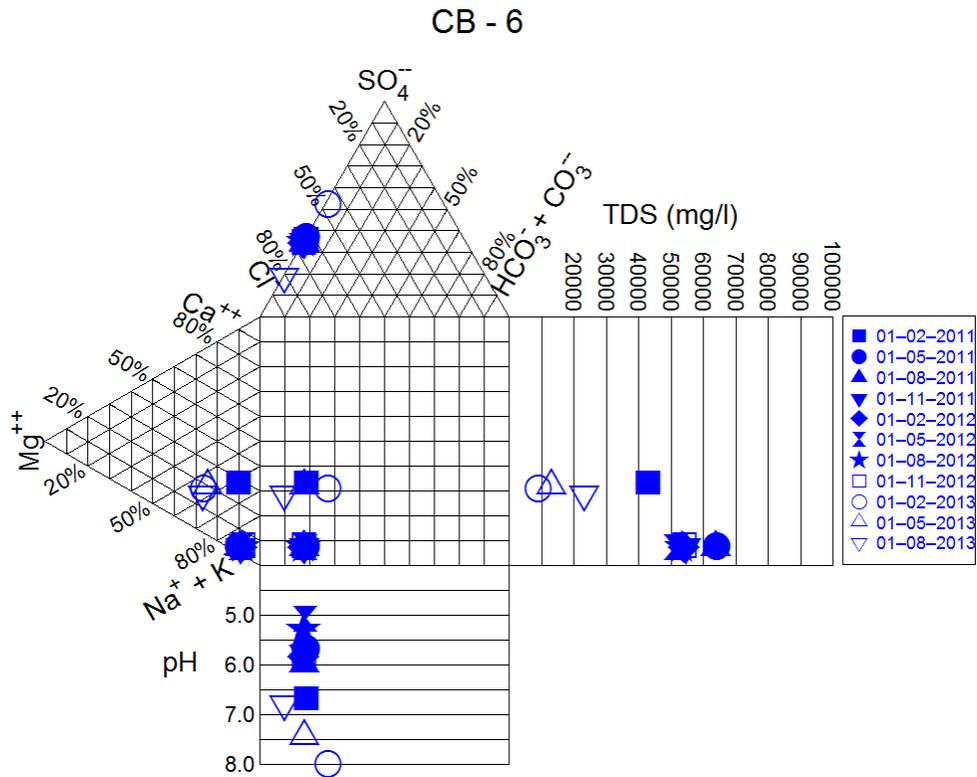
Anexo 4.5 Evolución temporal pozos CB: Mn, Mo, K, Fe, Zn, As, Cu y Co.



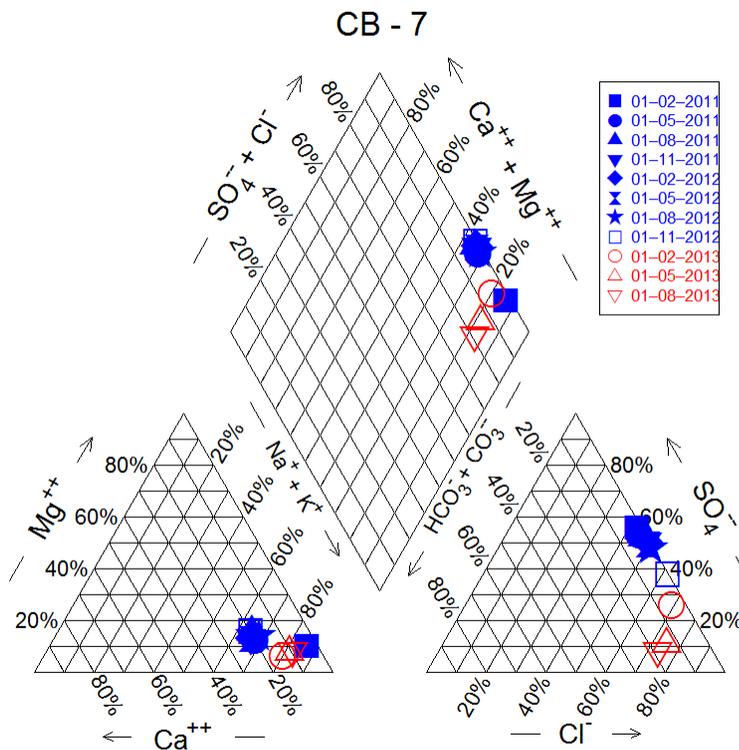
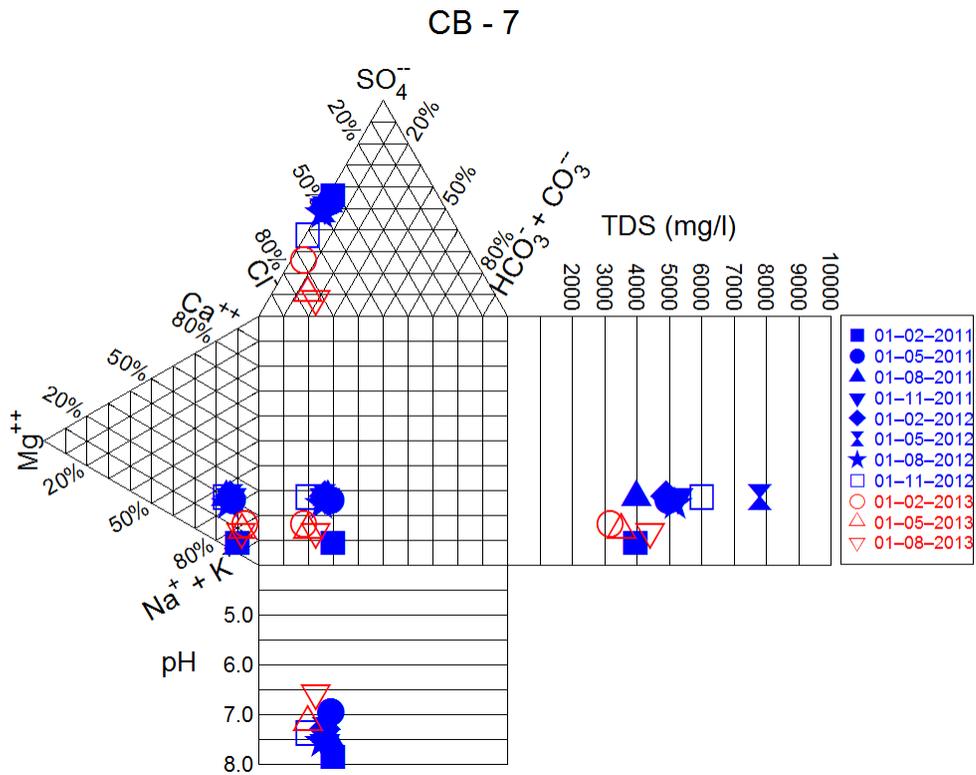
Anexo 4.6 Evolución temporal pozos CB: NO3, Hg, Ni, Pb y Si.



Anexo 4.7 Evolución temporal pozo KP-DH10-33 (datos de febrero 2011 a noviembre 2012) y CB-6 (datos de febrero 2013 a agosto 2013). Diagrama Durov (arriba) y diagrama Piper (abajo).



Anexo 4.8 Evolución temporal pozo KP-DH10-40 (datos de febrero 2011 a noviembre 2012) y CB-7 (datos de febrero 2013 a agosto 2013). Diagrama Durov (arriba) y diagrama Piper (abajo).



Anexo 5. Estadísticas

Anexo 5.1 Estadígrafo pozo de monitoreo SG-237

Parámetro		Unidad	WQS	QSCSG6-237					
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Prom.	Mediana
Fisicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		20	6,89	8,47	7,7	7,78
	Temperatura	°C			20	20,7	23,71	21,9	21,85
	TSS	mg/L			18	5	3266	360,2	65
	TDS	mg/L	500		18	23684	59100	29016,6	24900
	Alcalinidad	mg/L			20	78	138	104,1	99,5
	Conductividad	mS/cm			20	21,72	50,9	36,4	36,915
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		20	6760	27000	8254,1	7160
	SO4	mg/L	250		20	9973	14400	10758,1	10450
	NO3	mg/L			20	524	2330	668,6	560,5
	NO2	mg/L		18	2	0	0,112	0,0560	0,056
	Br	mg/L		18	2	3,85	134	68,9	68,925
	F	mg/L	1000	4	16	1,91	30,6	6,8	5,745
	PO4	mg/L		16	4	0,01	0,04	0,0275	0,03
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L		1	19	110	385	158,0	146
	Ca	mg/L			20	421	687	526,5	507,5
	Na	mg/L			20	8517,9	24800	10434,8	9720
	K	mg/L		4	16	43,4	254	66,8	53
	Al	mg/L	5	11	9	0,0170	2,2009	0,3015	0,0310
	Fe	mg/L	5	13	7	0,2200	0,6500	0,3994	0,3300
	Mn	mg/L	0,2	5	15	0,0025	0,0953	0,0211	0,0104
	Ni	mg/L	0,2	4	16	0,0030	1,9000	0,2289	0,1026
	As	mg/L	0,1	4	16	0,0012	0,0715	0,0514	0,0561
	Mo	mg/L	0,01	3	17	0,1260	0,5340	0,3434	0,3470
	Pb	mg/L	5	4	16	0,0002	0,0064	0,0015	0,0011
	Cu	mg/L	0,2	5	15	0,0157	0,6390	0,1876	0,1660
	Co	mg/L	0,05	10	10	0,0001	0,0077	0,0013	0,0005
	Zn	mg/L	2	4	16	0,0127	0,6750	0,0968	0,0501
Hg	mg/L	0,001	20						

Anexo 5.2 Estadígrafo pozo de monitoreo SG-402.

Parámetro		Unidad	WQS	QSG08-402					
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Promedio	Mediana
Fisicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		19	4,3	7,7	6,6	6,67
	Temperatura	°C			19	22,3	27,8	24,6	24,87
	TSS	mg/L			17	6,0	3280,0	431,9	66
	TDS	mg/L	500		16	39000,0	53480,0	45657,9	44900
	Alcalinidad	mg/L			18	105,0	190,0	162,9	166
	Conductividad	mS/cm			19	18,9	97,8	66,2	66,84
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		19	25300,0	33500,0	27932,9	27600
	SO4	mg/L	250		19	40,8	3550,0	2751,7	2839
	NO3	mg/L		2	16	7,6	65,5	21,4	13,8
	NO2	mg/L		16	3	0,21	0,91	0,50866667	0,406
	Br	mg/L		7	12	9,7	28,5	18,2	17,85
	F	mg/L	1000	16	3	1,4	6,8	3,6	2,54
	PO4	mg/L		15	4	0,05	0,1	0,0625	0,05
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L			19	1497	2180,0	1794,9	1770
	Ca	mg/L		1	18	2134,32	2940,0	2449,8	2430
	Na	mg/L			19	9970	17200,0	12438,0	12300
	K	mg/L		2	17	54,6	121,6	100,5	105
	Al	mg/L	5	16	3	0,054	0,693	0,32866667	0,239
	Fe	mg/L	5	11	8	0,2	4,1	1,7	1,027
	Mn	mg/L	0,2	1	18	3,7	10,1	8,2	8,5199
	Ni	mg/L	0,2	6	13	0,0095	0,9410	0,1343	0,0320
	As	mg/L	0,1	11	8	0,0004	0,0581	0,0196	0,0046
	Mo	mg/L	0,01	6	13	0,0087	0,0200	0,0113	0,0104
	Pb	mg/L	5	4	15	0,0044	0,0439	0,0123	0,0068
	Cu	mg/L	0,2	6	13	0,0188	0,3970	0,1548	0,1510
	Co	mg/L	0,05	6	13	0,0040	0,0119	0,0089	0,00947
	Zn	mg/L	2	1	18	0,0256	2,793	1,704	1,895
Hg	mg/L	0,001	18	1	0,0090	0,009	0,009	0,009	

Anexo 5.3 Estadígrafo pozo de monitoreo SG-493.

Parámetro		Unidad	WQS	QSG08-493					
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Promedio	Mediana
Fisicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		20	4,0	6,9	4,9	4,7
	Temperatura	°C			20	23,0	29,0	26,1	26,2
	TSS	mg/L			18	9,0	3515,0	314,5	30,0
	TDS	mg/L	500		17	10600,0	117280,0	63498,8	60366,0
	Alcalinidad	mg/L			14	10,0	92,0	43,5	40,0
	Conductividad	mS/cm			20	61,1	134,3	91,8	90,5
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		20	18099,0	41000,0	26651,0	26500,0
	SO4	mg/L	250		20	12146,0	23000,0	16139,8	15613,5
	NO3	mg/L			20	1524,0	3690,0	2285,6	2235,0
	NO2	mg/L		20					
	Br	mg/L		18	2	7,9	77,4	42,6	42,6
	F	mg/L	1000	14	6	3,2	5,9	4,7	5,0
	PO4	mg/L		15	5	0,07	12,6	2,634	0,11
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L		1	19	263,4	2920,0	564,6	422,0
	Ca	mg/L			20	560,0	903,0	690,9	668,5
	Na	mg/L			20	16579,8	39900,0	25899,1	25900,0
	K	mg/L		1	19	216,4	517,0	335,7	326,0
	Al	mg/L	5	4	16	0,011	1,590	0,934	1,035
	Fe	mg/L	5	11	9	0,160	1,600	0,701	0,490
	Mn	mg/L	0,2	4	16	0,402	34,300	2,638	0,469
	Ni	mg/L	0,2	4	16	0,031	7,660	0,816	0,215
	As	mg/L	0,1	14	6	0,004	0,034	0,018	0,015
	Mo	mg/L	0,01	13	7	0,001	0,208	0,033	0,003
	Pb	mg/L	5	3	17	0,009	0,040	0,019	0,018
	Cu	mg/L	0,2	4	16	0,029	115,000	8,631	1,550
	Co	mg/L	0,05	4	16	0,012	2,190	0,176	0,040
	Zn	mg/L	2	1	19	0,343	8,120	1,751	1,350
Hg	mg/L	0,001	15	5	0,003	0,005	0,004	0,004	

Anexo 5.4 Estadígrafo pozo de monitoreo CB-2.

Parámetro		Unidad	WQS	CB-2					
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Promedio	Mediana
Fisicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		3	7,2	8,1	7,7	7,9
	Temperatura	°C			3	21,5	23,2	22,2	21,7
	TSS	mg/L			3	1400,0	30000,0	11260,0	2380,0
	TDS	mg/L	500		3	13600,0	14800,0	14300,0	14500,0
	Alcalinidad	mg/L			3	35,0	60,0	48,7	51,0
	Conductividad	mS/cm			3	21,2	89,8	44,2	21,7
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		3	4510,0	4750,0	4643,3	4670,0
	SO4	mg/L	250		3	4510,0	4750,0	4643,3	4670,0
	NO3	mg/L			2	310,0	318,0	314,0	314,0
	NO2	mg/L			3				
	Br	mg/L			2	1	7,9	7,9	7,9
	F	mg/L	1000		3				
	PO4	mg/L			3				
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L			3	137,0	149,0	142,0	140,0
	Ca	mg/L			3	596,0	606,0	602,7	606,0
	Na	mg/L			3	4670,0	5210,0	4903,3	4830,0
	K	mg/L			3	37,1	45,8	42,5	44,5
	Al	mg/L	5		3	0,0200	10,0000	3,4017	0,1850
	Fe	mg/L	5	1	2	0,1500	0,2200	0,1850	0,1850
	Mn	mg/L	0,2		3	0,0130	0,0189	0,0156	0,0149
	Ni	mg/L	0,2		3	0,0043	0,1050	0,0392	0,0084
	As	mg/L	0,1		3	0,0478	0,0619	0,0552	0,0558
	Mo	mg/L	0,01		3	0,1610	0,3360	0,2313	0,1970
	Pb	mg/L	5		3	0,0008	0,0010	0,0009	0,0009
	Cu	mg/L	0,2		3	0,0102	0,0195	0,0148	0,0146
	Co	mg/L	0,05	1	2	0,0002	0,0006	0,0004	0,0004
	Zn	mg/L	2		3	0,0290	0,0968	0,0563	0,0432
Hg	mg/L	0,001		3					

Anexo 5.5 Estadígrafo pozo de monitoreo CB-3.

Parámetro		Unidad	WQS	CB-3					
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Promedio	Mediana
Fisicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		3	7,3	8,0	7,8	8,0
	Temperatura	°C			3	19,2	19,7	19,4	19,2
	TSS	mg/L			3	553,0	2450,0	1241,0	720,0
	TDS	mg/L	500		3	12700,0	15300,0	14333,3	15000,0
	Alcalinidad	mg/L			3	55,0	91,0	72,0	70,0
	Conductividad	mS/cm			3	17,8	80,0	40,3	23,0
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		3	4030,0	4880,0	4483,3	4540,0
	SO4	mg/L	250		3	4310,0	6570,0	5253,3	4880,0
	NO3	mg/L			3	334,0	3180,0	1288,7	352,0
	NO2	mg/L			3				
	Br	mg/L			3				
	F	mg/L	1000		3				
	PO4	mg/L			3				
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L			3	69,2	82,9	78,0	82,0
	Ca	mg/L			3	633,0	671,0	657,3	668,0
	Na	mg/L			3	4120,0	5530,0	4770,0	4660,0
	K	mg/L			3	43,1	57,1	51,6	54,5
	Al	mg/L	5	1	2	0,0150	4,0600	2,0375	2,0375
	Fe	mg/L	5	2	1	0,3800	0,3800	0,3800	0,3800
	Mn	mg/L	0,2		3	0,0365	0,2260	0,1012	0,0412
	Ni	mg/L	0,2		3	0,0081	0,0119	0,0094	0,0083
	As	mg/L	0,1		3	0,0340	0,0412	0,0366	0,0347
	Mo	mg/L	0,01		3	0,3010	0,3200	0,3090	0,3060
	Pb	mg/L	5	2	1	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
	Cu	mg/L	0,2		3	0,0127	0,0157	0,0141	0,0139
	Co	mg/L	0,05	1	2	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005
	Zn	mg/L	2		3	0,0269	0,0825	0,0479	0,0343
Hg	mg/L	0,001		3					

Anexo 5.6 Estadígrafo pozo de monitoreo CB-4.

Parámetro		Unidad	WQS	CB-4					
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Promedio	Mediana
Fisicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		4	6,5	7,5	7,0	7,0
	Temperatura	°C			4	21,0	26,5	23,6	23,5
	TSS	mg/L			4	5,0	128,0	44,5	22,5
	TDS	mg/L	500		4	54300,0	73600,0	62575,0	61200,0
	Alcalinidad	mg/L			4	174,0	340,0	267,8	278,5
	Conductividad	mS/cm			4	7,1	98,9	68,5	84,0
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		4	23800,0	33500,0	27525,0	26400,0
	SO4	mg/L	250		4	15200,0	19200,0	16925,0	16650,0
	NO3	mg/L			4	1900,0	2750,0	2280,0	2235,0
	NO2	mg/L		3	1	12,4	12,4	12,4	12,4
	Br	mg/L			4				
	F	mg/L	1000		4				
	PO4	mg/L			4				
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L			4	334,0	712,0	452,5	382,0
	Ca	mg/L			4	633,0	961,0	777,5	758,0
	Na	mg/L			4	23400,0	29800,0	27525,0	28450,0
	K	mg/L			4	263,0	458,0	343,3	326,0
	Al	mg/L	5	1	3	0,048	0,181	0,093	0,051
	Fe	mg/L	5	2	2	0,350	0,550	0,450	0,450
	Mn	mg/L	0,2		4	0,932	1,340	1,148	1,160
	Ni	mg/L	0,2		4	0,064	0,466	0,186	0,108
	As	mg/L	0,1	2	2	0,004	0,024	0,014	0,014
	Mo	mg/L	0,01		4	0,101	0,412	0,287	0,318
	Pb	mg/L	5		4	0,001	0,014	0,007	0,006
	Cu	mg/L	0,2	1	3	0,090	0,187	0,134	0,125
	Co	mg/L	0,05		4	0,009	0,018	0,011	0,010
	Zn	mg/L	2		4	0,171	0,422	0,322	0,347
Hg	mg/L	0,001		4					

Anexo 5.7 Estadígrafo pozo de monitoreo CB-5.

Parámetro		Unidad	WQS	CB-5					
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Promedio	Mediana
Fisicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		12	5,14	7,4	6,1	5,99
	Temperatura	°C			12	23,12	26,31	25,1	25,23
	TSS	mg/L			9	6	58	21,4	15
	TDS	mg/L	500		8	53400	57600	55800,0	56050
	Alcalinidad	mg/L			12	10	113	60,8	60,5
	Conductividad	mS/cm			12	70,92	117,5	84,4	83,38
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		12	23800	29800	25666,7	25400
	SO4	mg/L	250		12	15700	19400	16758,3	16550
	NO3	mg/L			12	2010	3280	2235,0	2105
	NO2	mg/L		12					
	Br	mg/L		12					
	F	mg/L	1000	12					
	PO4	mg/L		12					
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L			12	1170	2440	2042,5	2100
	Ca	mg/L			12	604	908	734,5	689,5
	Na	mg/L			12	19000	25000	22183,3	22500
	K	mg/L			12	262	485	346,6	335,5
	Al	mg/L	5	1	11	0,047	0,74	0,385	0,429
	Fe	mg/L	5	9	3	0,13	0,61	0,303	0,17
	Mn	mg/L	0,2		12	0,0196	36,5	24,7	25,75
	Ni	mg/L	0,2		12	0,316	0,576	0,405	0,374
	As	mg/L	0,1	7	5	0,0028	0,0173	0,012	0,0146
	Mo	mg/L	0,01	7	5	0,0027	0,0068	0,005	0,0053
	Pb	mg/L	5	4	8	0,0002	0,00215	0,001	0,000475
	Cu	mg/L	0,2	1	11	0,102	2,83	2,0	2,18
	Co	mg/L	0,05		12	0,00049	0,465	0,350	0,3815
	Zn	mg/L	2		12	0,38	3,67	2,8	3,045
Hg	mg/L	0,001	7	5	0,0036	0,013	0,006	0,0044	

Anexo 5.8 Estadígrafo pozo de monitoreo CB-6 (incluye datos de KP-DH10-33).

Parámetro		Unidad	WQS	CB-6					
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Promedio	Mediana
Fisicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		10	5,07	7,99	6,168	5,835
	Temperatura	°C			10	22,48	27,54	25	25,065
	TSS	mg/L			9	12	214	93,2	104
	TDS	mg/L	500		8	9000	54500	39012,5	52400
	Alcalinidad	mg/L			10	10	98	48,3	53
	Conductividad	mS/cm			10	14,26	115,7	67,312	72,155
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		10	2720	24200	17862	22800
	SO4	mg/L	250		10	3450	18100	12856	16250
	NO3	mg/L			10	125	1980	1414,4	1890
	NO2	mg/L		9	1	7,39	7,39	7,39	7,39
	Br	mg/L		10					
	F	mg/L	1000	10					
	PO4	mg/L		10					
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L			10	543	1390	1103,1	1215
	Ca	mg/L			10	541	1300	743,3	646
	Na	mg/L			10	2190	23100	16651	22100
	K	mg/L			10	23	384	237,16	303
	Al	mg/L	5	7	3	0,018	0,042	0,029	0,028
	Fe	mg/L	5	8	2	0,06	0,29	0,175	0,175
	Mn	mg/L	0,2		10	2,72	7,66	5,153	5,26
	Ni	mg/L	0,2		10	0,01430	0,44500	0,23627	0,28950
	As	mg/L	0,1	4	6	0,00034	0,01360	0,00738	0,00698
	Mo	mg/L	0,01		10	0,00680	0,33800	0,09135	0,01125
	Pb	mg/L	5	1	9	0,00013	0,30300	0,07767	0,05180
	Cu	mg/L	0,2		10	0,01240	14,40000	9,38515	12,85000
	Co	mg/L	0,05		10	0,00006	0,37900	0,20276	0,26450
	Zn	mg/L	2	1	9	0,02630	5,32000	3,24930	4,58000
Hg	mg/L	0,001	3	7	0,00720	0,02950	0,01411	0,01130	

Anexo 5.9 Estadígrafo pozo de monitoreo CB-7 (incluye datos de KP-DH10-40).

Parámetro		Unidad	WQS	CB-7					
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Promedio	Mediana
Fisicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		10	6,6	8,1	7,4	7,4
	Temperatura	°C			10	22,6	27,7	25,3	25,3
	TSS	mg/L			8	17,0	173,0	61,5	39,5
	TDS	mg/L	500		7	4120,0	7680,0	6307,1	7020,0
	Alcalinidad	mg/L			10	71,0	1030,0	245,1	88,0
	Conductividad	mS/cm			10	6,4	87,9	23,2	10,2
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		10	1190,0	2340,0	1810,0	1875,0
	SO4	mg/L	250		10	352,0	3110,0	1947,6	2380,0
	NO3	mg/L			9	0,7	247,0	152,4	183,0
	NO2	mg/L		5	5	1,2	2,6	2,1	2,4
	Br	mg/L		7	3	1,8	5,2	3,6	3,8
	F	mg/L	1000	10					
	PO4	mg/L		10					
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L			10	50,5	1440,0	278,1	183,0
	Ca	mg/L			10	150,0	853,0	410,9	435,0
	Na	mg/L			10	1160,0	23100,0	3777,0	1695,0
	K	mg/L			10	11,9	286,0	54,8	13,7
	Al	mg/L	5	3	7	0,0080	0,5640	0,1080	0,0340
	Fe	mg/L	5	5	5	0,0500	1,0300	0,4980	0,4700
	Mn	mg/L	0,2		10	0,0433	5,8200	0,8752	0,0608
	Ni	mg/L	0,2		10	0,0017	0,4550	0,0607	0,0155
	As	mg/L	0,1	1	9	0,0072	0,0694	0,0212	0,0128
	Mo	mg/L	0,01	1	9	0,0025	0,3390	0,2119	0,3090
	Pb	mg/L	5	1	9	0,0001	0,2340	0,0273	0,0015
	Cu	mg/L	0,2		10	0,0022	12,9000	1,3150	0,0279
	Co	mg/L	0,05		10	0,0002	0,2640	0,0276	0,0013
	Zn	mg/L	2		10	0,0086	5,3000	0,5464	0,0187
Hg	mg/L	0,001	6	4	0,0009	0,0029	0,0019	0,0020	

Anexo 5.10 Estadígrafo pozo de monitoreo CB-9.

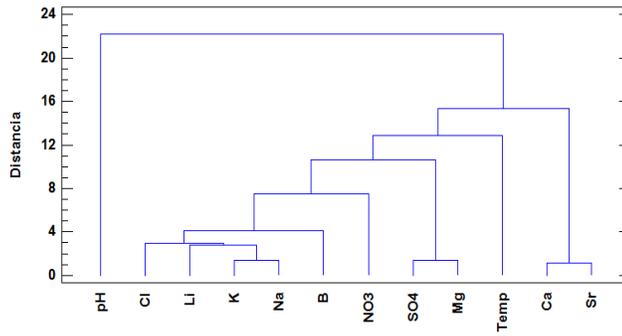
Parámetro		Unidad	WQS	CB-9					
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Promedio	Mediana
Físicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		10	6,0	7,9	7,2	7,3
	Temperatura	°C			10	22,8	28,9	25,2	25,1
	TSS	mg/L			8	29,0	137,0	80,4	75,0
	TDS	mg/L	500		7	53300,0	60900,0	57000,0	57000,0
	Alcalinidad	mg/L			10	125,0	482,0	378,5	407,0
	Conductividad	mS/cm			10	2,5	124,7	76,5	85,5
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		10	466,0	29300,0	22417,6	26600,0
	SO4	mg/L	250		10	938,0	62400,0	46703,8	56950,0
	NO3	mg/L			10	42,9	1960,0	1285,0	1485,0
	NO2	mg/L		6	4	0,36	7,32	4,58	5,32
	Br	mg/L		10					
	F	mg/L	1000	9	1	0,27	0,27	0,27	0,27
	PO4	mg/L		10					
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L			10	237	18600	13581,7	16100
	Ca	mg/L		1	9	410	937	585,3	512
	Na	mg/L			10	251	15500	11661,1	13900
	K	mg/L			10	4,79	153	113,049	131,5
	Al	mg/L	5	9	1	0,1710	0,1710	0,171	0,1710
	Fe	mg/L	5	3	7	0,1400	1,1300	0,669	0,7800
	Mn	mg/L	0,2		10	0,2970	24,5000	16,959	18,1500
	Ni	mg/L	0,2	1	9	0,0267	0,3540	0,104	0,0628
	As	mg/L	0,1		10	0,0048	0,2080	0,118	0,1240
	Mo	mg/L	0,01	1	9	0,0396	0,1050	0,070	0,0708
	Pb	mg/L	5		10	0,0001	0,0166	0,007	0,0056
	Cu	mg/L	0,2	1	9	0,0220	0,3730	0,152	0,1170
	Co	mg/L	0,05	1	9	0,0039	0,0215	0,013	0,0140
	Zn	mg/L	2		10	0,0915	0,3530	0,226	0,2680
Hg	mg/L	0,001	7	3	0,0044	0,0066	0,006	0,0056	

Anexo 5.11 Estadígrafo pozo de monitoreo CB-10.

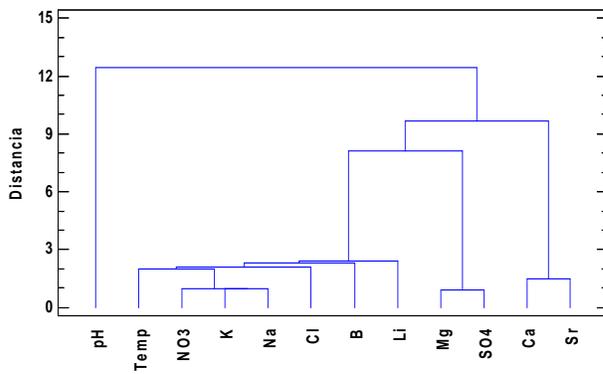
Parámetro		Unidad	WQS	CB-10						
			NCh1333	<L.D.	N	Min	Max	Promedio	Mediana	
Fisicoquímico (tomados en terreno)	pH		5,5 - 9		4	6,99	7,8	7,4	7,5	
	Temperatura	°C			4	23,74	26,8	25,0	24,7	
	TSS	mg/L			4	28	317,0	157,3	142,0	
	TDS	mg/L	500		4	34800	40800,0	37500,0	37200,0	
	Alcalinidad	mg/L			4	26	56,0	36,8	32,5	
	Conductividad	mS/cm			4	21,45	63,5	49,0	55,5	
Aniones (análisis de laboratorio)	Cl	mg/L	200		4	18100	19700,0	19025,0	19150,0	
	SO4	mg/L	250		4	1970	2140,0	2060,0	2065,0	
	NO3	mg/L			4	1130	1200,0	1167,5	1170,0	
	NO2	mg/L			4					
	Br	mg/L			4					
	F	mg/L	1000		3	1	2,45	2,45	2,45	2,45
	PO4	mg/L			4					
Cationes (análisis de laboratorio)	Mg	mg/L			0	4	208	309	265,5	272,5
	Ca	mg/L			0	4	2750	3340	3005	2965
	Na	mg/L			0	4	10600	11700	11175	11200
	K	mg/L			0	4	46,4	91,9	72,025	74,9
	Al	mg/L	5		1	3	0,028	0,118	0,07	0,064
	Fe	mg/L	5		2	2	1,05	1,62	1,335	1,335
	Mn	mg/L	0,2		0	4	0,0067	0,1160	0,0542	0,0471
	Ni	mg/L	0,2		0	4	0,0102	0,1600	0,0610	0,0370
	As	mg/L	0,1		0	4	0,0024	0,0441	0,0236	0,0239
	Mo	mg/L	0,01		0	4	0,0297	0,0731	0,0470	0,0427
	Pb	mg/L	5		0	4	0,0009	0,0144	0,0078	0,0079
	Cu	mg/L	0,2			3	0,0160	0,3560	0,1394	0,0462
	Co	mg/L	0,05		2	2	0,0002	0,0006	0,0004	0,0004
	Zn	mg/L	2		0	4	0,0191	0,1830	0,0659	0,0308
Hg	mg/L	0,001		4						

Anexo 5.12 Dendogramas año 2012 y 2013, según variables.

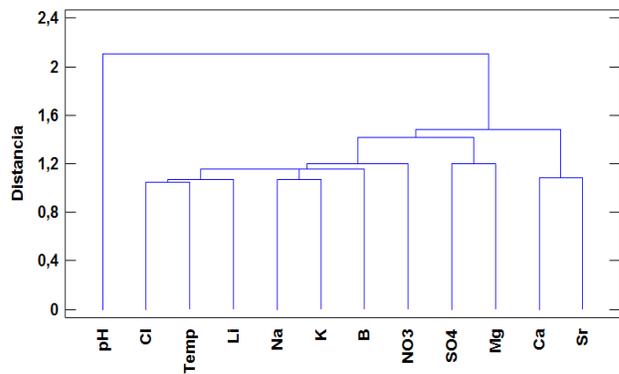
Dendograma Febrero 2013
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana Cuadrada



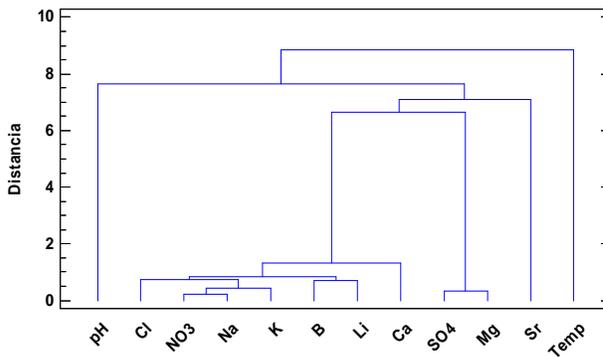
Dendograma Mayo 2012
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana Cuadrada



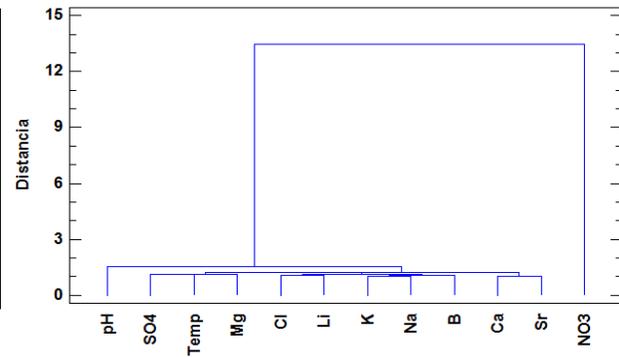
Dendograma Mayo 2013
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana



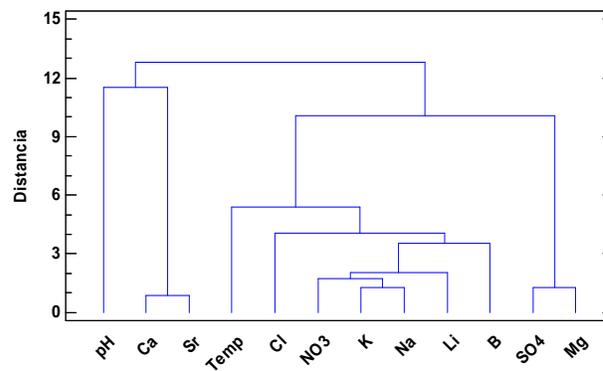
Dendograma Agosto 2012
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana Cuadrada



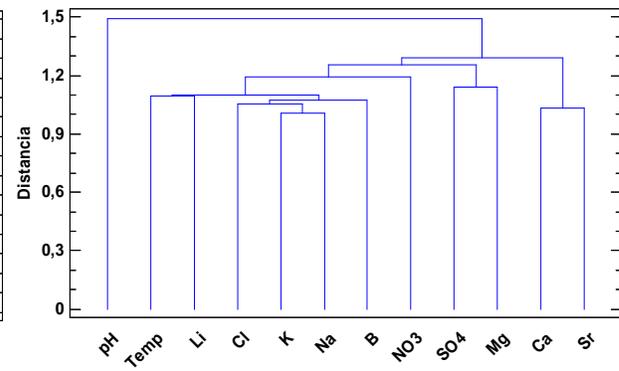
Dendograma Agosto 2013
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana



Dendograma Noviembre 2012
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana Cuadrada

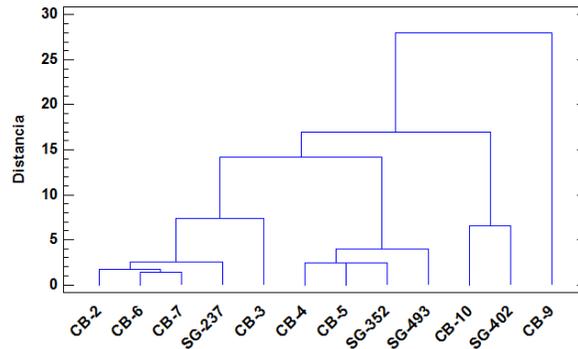


Dendograma Noviembre 2013
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana

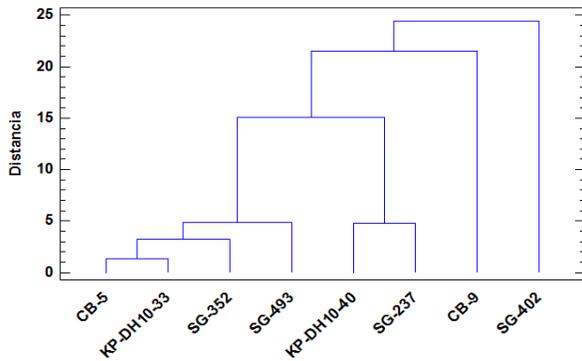


Anexo 5.13 Dendogramas año 2012 y 2013, según observaciones (pozos).

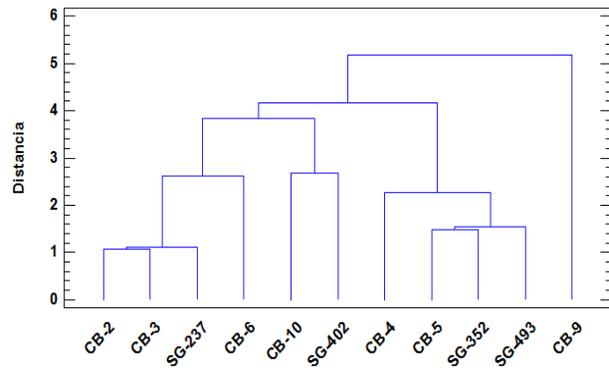
Dendograma Febrero 2013
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana Cuadrada



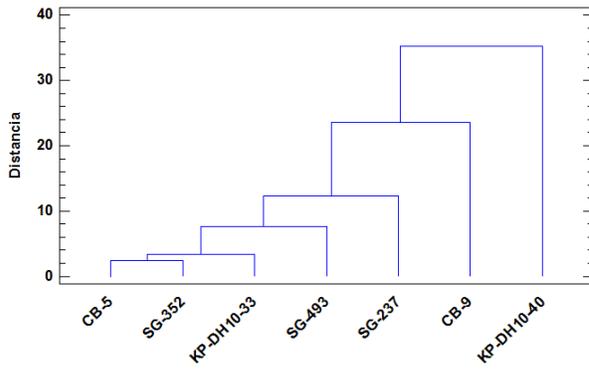
Dendograma Mayo 2012
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana Cuadrada



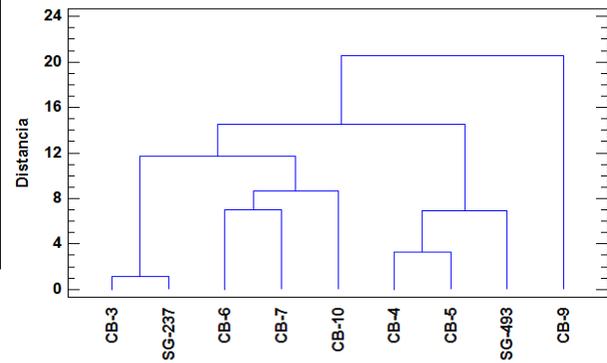
Dendograma Mayo 2013
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana



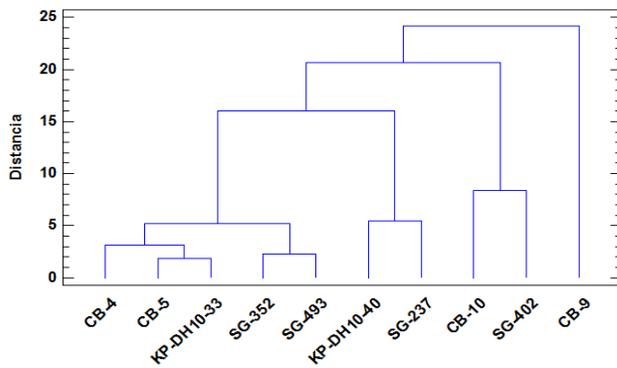
Dendograma Agosto 2012
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana Cuadrada



Dendograma Agosto 2013
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana Cuadrada



Dendograma Noviembre 2012
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana Cuadrada



Dendograma Noviembre 2013
Método del Vecino Más Cercano, Euclídeana Cuadrada

