



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



**METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FLUJOS
PREFERENCIALES DE CUENCA ENDORREICA PRE-ALTIPLÁNICA
UBICADA ENTRE 24°18'-24°37'S Y 69°00'-69°13'W, ESCONDIDA-BHP,
REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Catalina Alejandra de Lourdes Ferrada Villanueva

Profesor Patrocinante:

Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo

Profesional Guía:

MSc. María del Carmen Pérez Pavón

Profesores Comisión:

Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado

MSc. Liubow Nikolaivna González Martínez

Concepción, 2020

*A todos aquellos que me han ayudado a ser quien soy
y a llegar donde estoy, en especial a mi familia.*

“El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza”

Leonardo Da Vinci

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS AL ÁREA DE ESTUDIO	2
1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	3
1.4. TRABAJOS ANTERIORES	5
1.5. AGRADECIMIENTOS	7
2. METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR FLUJOS PREFERENCIALES DE AGUA	8
3. MARCO GEOLÓGICO	12
3.1. GEOMORFOLOGÍA	12
3.1.1. Geomorfología Local	13
3.2. GEOLOGÍA REGIONAL	15
3.2.1. Paleozoico	15
3.2.2. Mesocenoico	18
3.3. GEOLOGÍA LOCAL	24
3.3.1. Rocas Estratificadas	24
3.3.2. Rocas Intrusivas	27
3.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	27
3.4.1. Geología Estructural Regional	27
3.4.2. Geología Estructural Local	27
4. HIDROLOGÍA	32
4.1. RED HIDROGRÁFICA	32
4.2. CLIMATOLOGÍA	34
4.2.1. Climatología Local	35
4.2.1.1. Precipitación y Temperatura	35
4.2.1.2. Radiación Solar	37
4.3. SUELOS	39
4.4. BALANCE HIDROLÓGICO	40
5. ENSAYOS Y TÉCNICAS ANALÍTICAS	45
5.1. REVISIÓN DE SONDAJES	45
5.1.1. R.Q.D.	47
5.2. NIVELES Y CAUDALES	50
5.3. ENSAYOS HIDRÁULICOS	54
5.4. HIDROGEOQUÍMICA	56
5.4.1. Calidad de agua pre-operacional a TLS	57

5.4.2. Calidad de agua durante operaciones de TLS	58
5.4.2.1. Diagramas de Patrones Hidroquímicos para LS	60
5.4.2.2. Índices Hidroquímicos para LS	65
5.4.2.3. Isótopos Estables	69
5.5. GEOFÍSICA	72
5.5.1. Métodos Geoelectrónicos	72
5.5.1.1. Tomografía Eléctrica 2D	73
6. HIDROGEOLOGÍA	75
6.1. MODELO CONCEPTUAL LAGUNA SECA	75
6.1.1. Dominio del Modelo	75
6.1.2. Condiciones de Borde	76
6.1.3 Unidades Hidrogeológicas	78
6.1.3.1. Propiedades Hidráulicas de las UH	85
7. RESULTADOS	87
7.1. IDENTIFICACIÓN DE FLUJOS SUPERFICIALES	87
7.2. IDENTIFICACIÓN DE FLUJOS SUBTERRÁNEOS	90
7.2.1. Piezometría	90
7.2.2. Análisis Hidroquímico	95
7.2.3. Geofísica	99
8. PROPUESTA RED DE MONITOREO	102
9. CONCLUSIÓN	105
10. RECOMENDACIONES	108
11. REFERENCIAS	109
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Mapa de ubicación del área de estudio	3
2. Metodología de trabajo memoria de título	4
3. Metodología para identificar flujos preferenciales de agua	9
4. Mapa geomorfológico cuenca Laguna Seca	14
5. Mapa con litologías principales de la geología regional	16
6. Mapa geología local cuenca Laguna Seca	25
7. Geología estructural del área de estudio	28
8. Modelo de bloques y configuración estructural de la cuenca LS	30
9. Modelo de bloques creado en Leapfrog para la cuenca LS	31
10. Red hidrográfica para la cuenca Laguna Seca	33
11. Modelo conceptual de balance de aguas para TLS	42
12. Fotografías del sondaje SP-12	46
13. Orientación rumbos y manteos de sondaje SP-12	47

14. Perfil esquemático de sondajes realizados en la cuenca LS	49
15. Nivel freático histórico en pozos ubicados aguas arriba del muro	51
16. Nivel freático en pozos actuales ubicados aguas arriba del muro	51
17. Nivel freático histórico en pozos de observación aguas abajo del muro	52
18. Nivel freático actual en pozos de observación aguas abajo del muro	52
19. Caudal de bombeo pozos de la cortina en los últimos dos años	53
20. Nivel freático en pozos de la cortina en los últimos dos años (a)	53
21. Nivel freático en pozos de la cortina en los últimos dos años (b)	54
22. Diagrama de Piper para aguas pre TLS	58
23. Diagrama de Piper para aguas TLS periodo enero-marzo 2020	62
24. Diagrama de Schöeller para aguas TLS	63
25. Diagramas de Schöeller (a y b, respectivamente)	64
26. Perfiles de tomografía eléctrica en sector bajo el muro del TLS	74
27. Vista en planta esquemática con las condiciones de borde de la cuenca LS	77
28. Unidades Hidrogeológicas de la cuenca Laguna Seca	80
29. Modelo 2D de flujos superficiales	88
30. Modelo 3D para flujos superficiales	89
31. Piezometría diseñada con ArcGIS	91
32. Piezometría 2D realizada en Surfer	92
33. Piezometría 3D realizada en Surfer	92
34. Modelo 2D piezometría más topografía	93
35. Visualizador de superficies en Visual Modflow	94
36. Mapa de isoconcentración de cloruro	95
37. Mapa de isoconcentración de nitrato	98
38. Mapa de isoconcentración de cobre	98
39. Integración de perfiles de tomografía eléctrica para determinar flujo de agua	99
40. Perfil geofísico con orientación NO-SE, sector aguas abajo del muro TLS	100
41. Sección del modelo geológico	100
42. Ubicación de pozos que se incluyen en la propuesta de monitoreo	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Temperatura y precipitaciones registradas por la estación meteorológica LS	36
2. Radiación solar media y media máxima mensual (Estación Laguna Seca)	38
3. Radiación solar media y media máxima mensual (Estación Cerro Marcelo)	38
4. Descripción del sondaje SP-12	46
5. Parámetros hidráulicos para las unidades geológicas	55
6. Parámetros químicos pre TLS	57
7. Concentraciones de aniones y cationes mayoritarios en mg/L	59
8. Datos entregados por EASYQUIM	61
9. Aniones y cationes mayoritarios en meq/L	61

10. Índices hidroquímicos para LS	65
11. Parámetros hidráulicos para las unidades hidrogeológicas	85
12. Propuesta de monitoreo	104

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	Página
1. Temperatura vs Precipitaciones	36
2. Radiación solar Estación Laguna Seca	38
3. Radiación solar Estación Cerro Marcelo	39
4. Concentraciones de Cl y NO ₃	60
5. Índice Mg/Ca	66
6. Índice K/Na	66
7. Índice Cl/HCO ₃	67
8. Índice SO ₄ /Cl	67
9. Índice Na/Cl	68
10. Índice Mg/Cl	68
11. Índice SO ₄ /Ca	69
12. Isótopos estables de agua para mayo 2017	71
13. Isótopos estables de agua para noviembre 2017	71
14. Rangos de conductividad hidráulica para cada UH	86
15. Concentraciones de Cl ordenadas en dirección NW-SE	96
16. Variaciones de concentraciones de Cl para el primer trimestre 2020	97

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
1. Climatología	112
2. Datos obtenidos con el software EASYQUIM	114
3. Pasos para trabajar en Surfer (V.18)	115

RESUMEN

El presente trabajo fue desarrollado durante el Programa de Prácticas y Memorias 2020 de la empresa BHP. El objetivo principal consiste en definir una metodología para identificar flujos de agua preferenciales en cuencas endorreicas, considerando como caso de estudio la cuenca Laguna Seca (LS), y además, proponer una red de monitoreo mínima que permita la supervisión de las aguas subterráneas para este caso en particular.

La cuenca Laguna Seca se encuentra ubicada en la zona pre-altiplánica de la Región de Antofagasta y contiene al tranque de relaves del mismo nombre, sector donde Escondida-BHP envía los relaves producidos por las plantas concentradoras. De lo anterior, radica la importancia de mantener un control de la calidad de las aguas e identificar los flujos preferenciales al interior de la cuenca.

La metodología que se propone en este trabajo consiste en inicialmente realizar un detallado estudio y análisis de seis pilares fundamentales: Geología (y Geomorfología), Geología estructural, Hidrología, Hidrogeoquímica, Ensayos de bombeo y Geofísica. Luego, se propone identificar los flujos preferenciales de agua superficial mediante el análisis de la Hidrología y los flujos subterráneos mediante el análisis de la Piezometría, Hidroquímica y Geofísica.

Para analizar la dirección y sentidos de los flujos de agua se utilizan distintos softwares de sistemas de información geográfica para crear modelos de la red hidrográfica, superficie piezométrica y distribución espacial de iones mayoritarios. De manera general, los modelos muestran un flujo radial hacia el centro de la cuenca, los cuales llegan hasta la laguna del tranque de relaves.

La metodología planteada permite identificar las tendencias de flujos de agua principales de LS y además permite tener un conocimiento generalizado del comportamiento hidráulico y las características fisicoquímicas de las aguas, lo que permite establecer zonas óptimas para la propuesta de una red monitoreo.

Con la información proporcionada por este estudio, se espera contribuir en futuros proyectos de monitoreo de la cuenca Laguna Seca y que esta metodología pueda ser aplicada en esta o cualquier cuenca endorreica.

1. INTRODUCCIÓN

El yacimiento Escondida está ubicado en el norte de Chile, en el Desierto de Atacama, a 170 kilómetros al sureste de la ciudad de Antofagasta y a 3.100 m s.n.m. Escondida-BHP es una empresa minera dedicada a la extracción de cobre, la cual utiliza procesos de concentración metalúrgico y procesos hidrometalúrgicos, para producir concentrados y cátodos de cobre, respectivamente. La extracción del mineral es realizada desde dos minas a rajo abierto, Escondida y Escondida Norte; para luego ser procesado en alguna de las tres plantas concentradoras, Los Colorados, Laguna Seca 1 y Laguna Seca 2; o en la planta de electro-obtención, dependiendo de la naturaleza del mineral.

Una vez terminado el proceso productivo, se envían los relaves de las plantas concentradoras al Tranque de Relaves Laguna Seca (TLS), ubicado en la cuenca del mismo nombre. Este tranque abarca un área aproximada de 62 km², está ubicado a unos 16 km al sur del rajo principal, posee una capacidad autorizada de 4.500 millones de toneladas y ha sido operado por Escondida desde principios del año 2002.

La cuenca Laguna Seca corresponde a una cuenca hidrográfica endorreica, situada en una cuenca intermontana al interior de la Cordillera de Domeyko, a unos 140 km al sureste de Antofagasta y abarca un área aproximada de 296 km²; la altura máxima corresponde a 3.800 m s.n.m. en el borde noreste, mientras que la altura mínima es del orden de 2.900 m s.n.m. en el sector central de la cuenca.

Según SEA (2012) un modelo conceptual consiste en una descripción cualitativa de la hidrología (recargas, descargas), de la hidrogeología (dominio, unidades estratigráficas, parámetros hidráulicos, recargas, descargas) y de su respuesta frente a las variables forzantes. El propósito de esta memoria es plantear una metodología apropiada para la identificación de flujos preferenciales dentro de la cuenca Laguna Seca, utilizando como base el modelo conceptual hidrogeológico. Se analizará el funcionamiento hidráulico de la cuenca a través del análisis de información histórica de la reportabilidad, como ejemplo de aplicación a la metodología, y se dará un mayor enfoque a las recomendaciones que se deriven del análisis de esta información. Además, una vez analizados todos los antecedentes disponibles, se procederá a diseñar la propuesta de una red de monitoreo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Definir una metodología para la identificación de flujos preferenciales en cuencas endorreicas, tomando como área de estudio la cuenca Laguna Seca y, además, proponer una red de monitoreo mínima que permita la supervisión de las aguas subterráneas en la cuenca LS.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para lograr el desarrollo del objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar estructura del modelo conceptual de la cuenca Laguna Seca.
2. Identificar potenciales líneas preferenciales de flujo.
3. Desarrollar una propuesta de estudio de caracterización y red de monitoreo para los próximos cinco años.

1.2 UBICACIÓN Y ACCESOS AL ÁREA DE ESTUDIO

El yacimiento Escondida, se ubica en la Cordillera de Domeyko, a 145 km al sureste de la ciudad de Antofagasta (Figura 1), Segunda Región de Chile, a una altura de 3.100 m s.n.m.

El acceso a las instalaciones de Escondida-BHP, se inicia desde la ciudad de Antofagasta, a través de la Avenida La Minería (ruta B-28), que corresponde a la salida sur de esta ciudad. Al llegar a la intersección con la Ruta 5 (Panamericana Norte), se sigue el camino que se interna hacia el este, que corresponde a la ruta B-475 (La Negra – Escondida), por el cual se recorren aproximadamente 130 km de camino asfaltado, hasta llegar a la caseta de control de acceso del yacimiento Escondida.

La cuenca Laguna Seca (LS) se encuentra ubicada a 16 km aproximadamente al suroeste de los rajos, a la cual se ingresa por un camino interno del complejo minero, y comprende un área de aproximadamente 332 km². LS se encuentra ubicada en una depresión topográfica del sector medio de la Cordillera de Domeyko. La latitud y longitud de la cuenca corresponden a aproximadamente 24°S y 69°W, respectivamente. Los límites del sector están dados por la cuenca pre altiplánica del Salar de Punta Negra por el este, la cuenca del Salar de Hamburgo hacia el norte y una serie de cordones montañosos hacia el oeste, los cuales forman parte de la Cordillera de Domeyko y poseen una dirección preferencial norte (N).

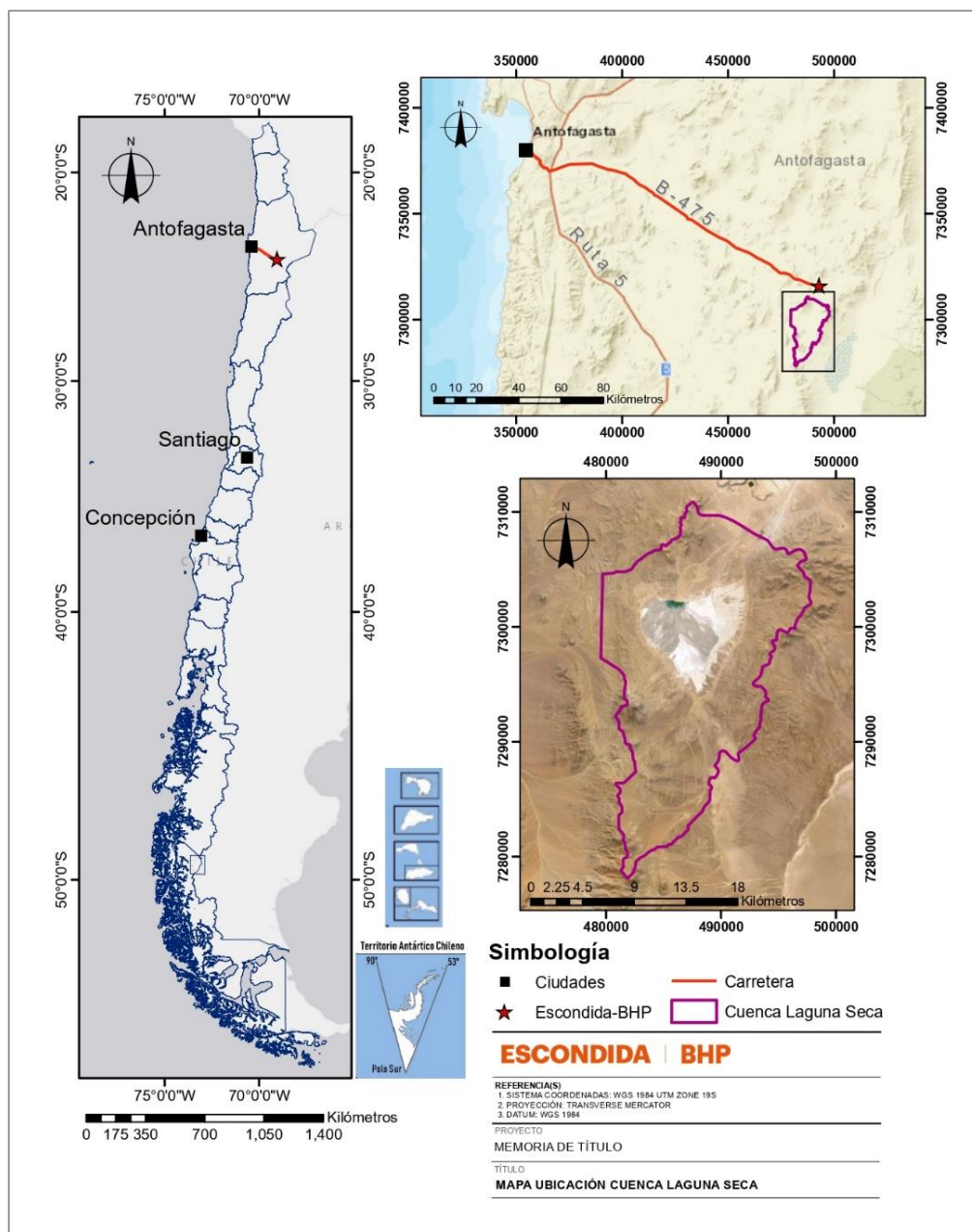


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio.

1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Comprender los factores principales que se integran en un modelo conceptual es la base para caracterizar el comportamiento hidráulico e incluso hidroquímico de la cuenca, desde el punto de vista espacial y temporal. La creación de un modelo conceptual considera seis ejes principales:

1. **Geología y geomorfología:** Describir la geología regional y local para identificar litologías, mineralogía y alteraciones. Además, tener definidos el modelo geológico y geomorfológico permite definir de manera cualitativa zonas de recarga.
2. **Geología estructural:** Identificar y analizar estructuras (fallas o lineamientos).
3. **Hidrología:** Identificar, delimitar y analizar la red hidrográfica de la cuenca.
4. **Hidroquímica e isótopos:** Analizar datos de hidrogeoquímica e identificar flujos preferenciales a partir de concentraciones y razones elementales.
5. **Ensayos hidráulicos:** Definir parámetros hidráulicos y comportamiento del acuífero. Analizar datos de niveles y caudales de pozos.
6. **Revisión de sondajes:** Identificar calidad de la roca (RQD) y zonas de debilidad estructural. Describir sondajes permite observar cambios litológicos, mineralogía, alteraciones y estructuras.

La finalidad de este trabajo es presentar una metodología para la identificación de flujos preferenciales que presenta la cuenca Laguna Seca, la cual pueda ser utilizada en distintos modelos y estudios que sea necesario realizar en la cuenca. Durante el desarrollo de esta memoria de título se explicarán detalladamente las distintas variables que son necesarias para caracterizar un acuífero, variables que son resumidas en la Figura 2.

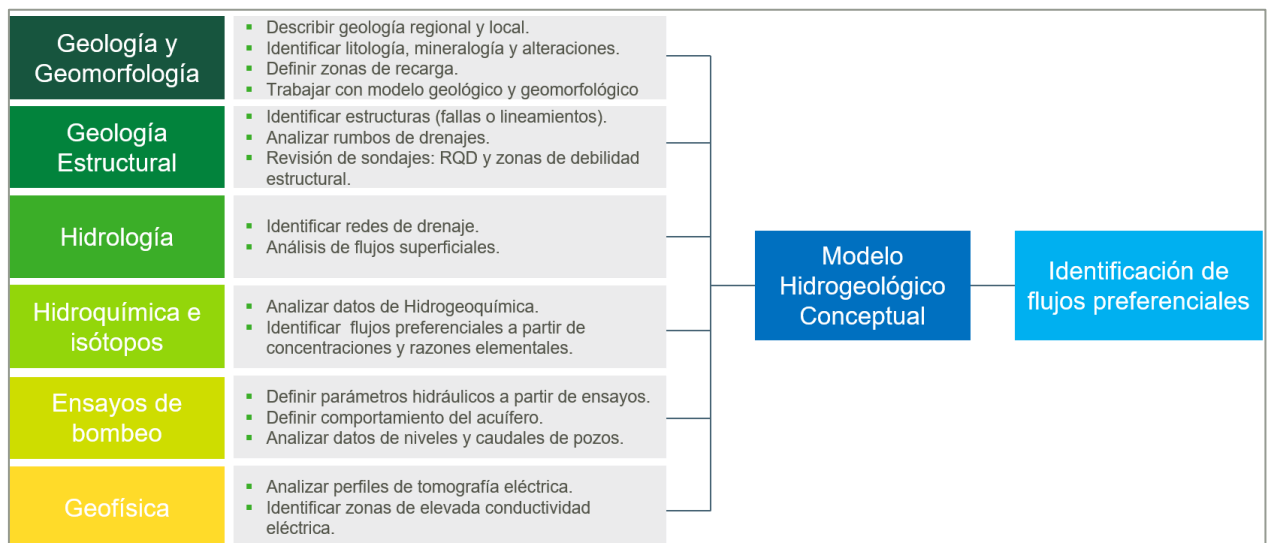


Figura 2: Metodología de trabajo memoria de título.

De forma generalizada, la metodología a utilizar para cumplir con los puntos mencionados anteriormente es:

- Recopilar información bibliográfica cuantitativa y cualitativa de LS (geología, geomorfología, geología estructural, hidrología, hidrogeoquímica, ensayos de bombeo y/o revisión de sondajes)
- Recopilar información bibliográfica para identificar metodologías de análisis hidroquímico.
- Confeccionar una base de datos con los pozos históricos, para el caso del área de estudio de Laguna Seca, serán aquellos de la reportabilidad legal asociados con su respectiva información geológica e hidrogeológica.
- Realizar análisis de antecedentes que permitan elaborar un modelo conceptual.
- Utilizar *software* de sistema de información geográfica como ArcGis, para realizar mapas de ubicación, litologías, unidades hidrogeológicas, etc.
- Interpretación de ensayos y obtención de parámetros hidráulicos.
- Analizar los resultados históricos de análisis químicos realizados a muestras de agua, con la finalidad de diferenciar los distintos flujos preferenciales dentro de la cuenca.
- Analizar información de niveles y caudales para determinar isopiezas y líneas de flujo.
- Utilizar *software* de modelamiento para evaluar de manera tridimensional el comportamiento del acuífero.
- Diseñar una red de monitoreo enfocada en disminuir la incertidumbre en sectores con baja cantidad/calidad de información.

1.4 TRABAJOS ANTERIORES

El yacimiento Escondida tiene un extenso registro histórico de estudios relacionados a la exploración minera. En la década de 1970 se realizaron estudios de factibilidad para estudiar el proyecto que sería Escondida, a mediados de 1980 comenzaron las campañas de exploración geoquímica para determinar la ubicación y geometría del cuerpo mineralizado. La construcción de la mina empezó en agosto de 1988, para finalmente, comenzar sus operaciones en 1990 hasta el presente.

Los estudios asociados a la cuenca Laguna Seca comienzan en 1997, con la finalidad de fundar el tranque de relaves que actualmente utiliza Escondida-BHP. En el año 2001, comenzó la construcción del muro de partida del tranque, permitiendo que este entrara en operación en el año 2002.

Escondida-BHP cuenta con distintos estudios geológicos, estructurales, geofísicos e hidrogeoquímicos y por aproximadamente 20 años, la cuenca Laguna Seca ha estado en constante monitoreo fisicoquímico.

Para realizar la presente memoria de título se utilizaron distintos trabajos asociados al área de estudio, a la cuenca Laguna Seca y al yacimiento Escondida. A continuación, se mostrarán algunos de ellos:

Aravena y otros (1999) definieron la composición isotópica (oxígeno y deuterio) y el origen de las precipitaciones para el norte de Chile.

Arcadis (2019) realizaron un estudio de caracterización geotécnica para TLS.

Boschetti y otros (2019) definieron una línea meteórica local para el norte de Chile utilizando un método de regresión de error en variables a la proporción isotópica estable de oxígeno e hidrógeno de la precipitación.

Celis, D. (2012) realizó un análisis acerca del modelo de balance de aguas del tranque de relaves Laguna Seca y el impacto económico en los procesos de Escondida. Este trabajo presenta una descripción del balance de aguas del tranque de relaves muy similar al descrito por Golder (2018).

Chong, G. (1973) realizó el reconocimiento de la geología del área Catalina-Sierra de Varas y la estratigrafía del Jurásico del Profeta.

DICTUC. (2009) realizaron una estimación de la recarga natural en cuencas altiplánicas.

Golder (2018) realizaron un informe que presenta el modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca Laguna Seca.

Marinovic, y otros (1995) realizaron una descripción detallada de la geología del área de estudio y sus alrededores en la carta geológica Aguas Blancas.

Urzúa, F. (2009) realizó un estudio de la geocronología y la evolución estructural del distrito minero de Escondida, la cual ayuda a caracterizar la geología estructural del área de estudio.

1.5 AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo fue guiado y financiado por la Superintendencia de Geotecnia e Hidrogeología de Escondida-BHP, estoy infinitamente agradecida de haber sido recibida y aceptada por este equipo de trabajo multidisciplinario, y por darme la oportunidad de realizar esta memoria de título en un tema tan importante para la minería y el medioambiente. Me siento afortunada haber compartido con excelentes profesionales, especialmente, quisiera agradecer a mi tutora, Carmen Pérez, por guiarme, apoyarme y corregirme durante el desarrollo de este trabajo. A Adriana Sánchez, por orientarme profesional y personalmente, enseñarme las distintas perspectivas que puede ofrecer la Hidrogeología y que la ciencia y el arte son primordiales para mi desarrollo integral. A Nicolle Troncoso y Gustavo Donoso, por ser grandes amigos y mentores, apoyarme y exigirme, y ser un apoyo fundamental durante mi estadía en Antofagasta. Finalmente, agradecer a Pablo Marambio, por su disposición a resolver dudas, aportar con comentarios y apoyarme con su conocimiento sobre la cuenca Laguna Seca.

Agradezco a los profesores y personal del DCT de la Universidad de Concepción, por tantos años de entrega de conocimiento y experiencias, pilares fundamentales en mi formación académica y personal. A la Dra. Verónica Oliveros, profesora patrocinante de esta memoria de título, le estoy eternamente agradecida por apoyarme y alentarme desde el primer momento, por confiar en mí en las distintas etapas de mi formación académica y profesional. A las profesoras de la comisión, muchas gracias por impulsarme a continuar por este hermoso camino. Además, agradecer a Don Luis Vásquez y Sra. Carolina Rojas, por todo su apoyo durante el desarrollo y la gestión de esta memoria de título.

De forma especial, quiero agradecer a Bárbara Tapia, por el apoyo que me ha brindado durante tantos años, por acompañarme y aconsejarme, gracias por creer en mí e impulsarme a postular a BHP; fue el empuje que me trajo hasta esta instancia.

Finalmente, agradezco y dedico esta memoria de título a mi familia, el pilar fundamental de mi vida, agradezco por tanto amor, paciencia y apoyo incondicional, hacen que todo el esfuerzo valga la pena y que cada logro tenga sentido. A mis amigos, Alonso, David, Cami, Cata y Vero, le dieron luz y color a mi vida universitaria, hicieron de ella una experiencia inolvidable, gracias por todo lo vivido.

2. METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR FLUJOS PREFERENCIALES DE AGUA

En términos generales, una metodología radica en presentar el conjunto de métodos utilizados para alcanzar un objetivo o llegar a una conclusión; y el propósito de este trabajo es presentar el conjunto de datos que se requiere para identificar flujos de agua en una cuenca endorreica y cómo proceder ante el análisis de dichos datos, tomando como ejemplo la cuenca Laguna Seca.

Los flujos preferenciales de agua se dividen en flujos superficiales y flujos subterráneos, de acuerdo al medio por el que circula el agua. Determinar la dirección y sentido de estos flujos es fundamental para comprender y analizar el comportamiento hidráulico de una cuenca, siendo este análisis primordial en las cuencas asociadas a la industria minera.

Realizar un trabajo de esta envergadura requiere de un detallado estudio hidrogeológico, el cual debe incluir el análisis de variables geológicas, hidrológicas e hidrogeoquímicas, este estudio, generalmente, es representado en el modelo hidrogeológico conceptual.

Un estudio hidrogeológico parte por un estudio geológico, el cual tiene la finalidad de caracterizar la geología de la superficie y de la sub-superficie, identificando los distintos tipos de rocas o unidades geológicas presentes en el área a modelar, su grado de consolidación y/o fracturamiento y su disposición espacial. Generalmente las unidades de roca o formaciones, tienen comportamientos o parámetros hidráulicos distintos y es posible definir las como unidades hidrogeológicas; en el caso de que existan distintas unidades geológicas con comportamiento hidráulico similar, eventualmente, estas podrían agruparse en una misma unidad hidrogeológica, este punto será explicado en detalle en el trabajo.

Para cada análisis que se realiza, ya sea, medición de los niveles de agua en los pozos, hidroquímica o geofísica, es necesario siempre tener presente la configuración geológica del área que se está estudiando, para que, llegado el momento de realizar interpretaciones, los datos tengan sentido y sean consistentes con la geología.

Por lo tanto, para identificar flujos de agua en cuencas endorreicas, se propone en primer lugar, realizar un análisis detallado de la geología del área de estudio, para luego trabajar y analizar los datos que se presentan en el siguiente esquema (Figura 3) y que serán explicados a continuación:

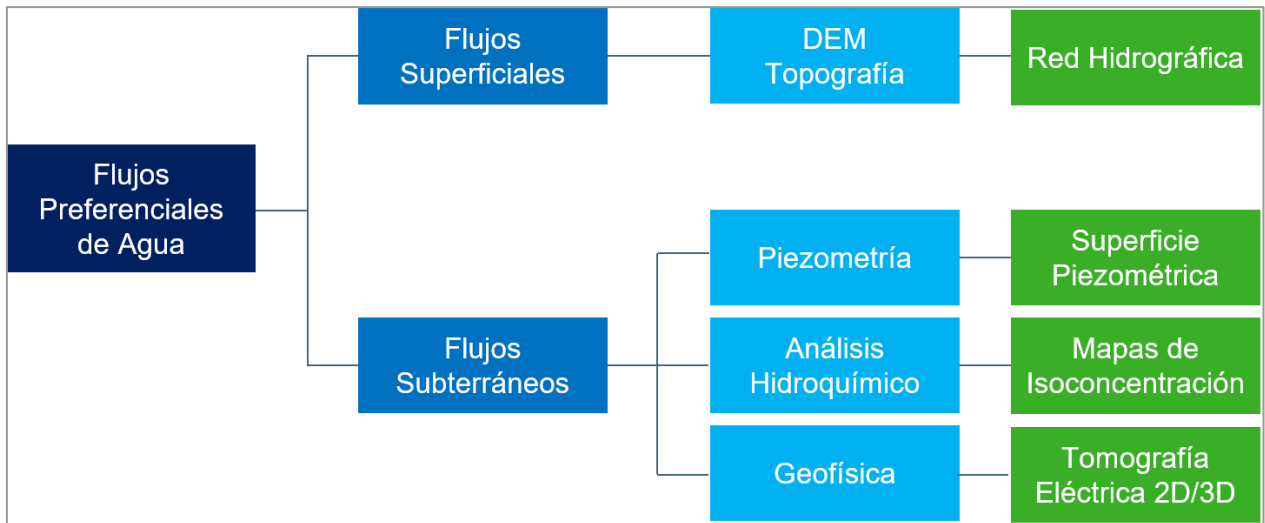


Figura 3: Metodología para identificar flujos preferenciales de agua.

Para identificar los flujos superficiales de agua se propone utilizar Modelos de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés), para visualizar la topografía del área de estudio, y mediante la ayuda de *software* GIS, crear la red hidrográfica de la cuenca que se está estudiando, siendo esta última una respuesta a la geología y geomorfología de la cuenca. De forma detallada se propone realizar el siguiente procedimiento:

- Utilizar el *software GlobalMapper* para descargar el DEM del área de estudio y utilizar la herramienta *Watershed* para crear la red de drenaje preliminar. Exportar las polilíneas obtenidas en formato shp. para poder trabajarlas en ArcGIS.
- Importar las líneas creadas en el punto anterior a ArcGIS. Utilizar una base de mapeo del área de estudio (imagen satelital o un *hillshade*) para verificar y dar precisión manualmente a las polilíneas de la red de drenaje. Guardar las polilíneas en formato shp.
- En ArcGIS, se propone utilizar el DEM como *basemap* y crear una serie de puntos que cubran el área en estudio utilizando la herramienta *Create Random Points*. Asignar las coordenadas a los puntos creados y calcular la altura desde el DEM con la herramienta *Add Surfer Information*, para finalmente exportar los puntos creados a una base de datos en formato txt.
- Importar la base de datos al *software Surfer* para poder modelar en 3D. Ingresar los datos desde el archivo txt. con los respectivos valores de x-y-z y con la herramienta *Map Wizard*,

seleccionar la opción *Contour* y *Wireframe 3D*. Manualmente unir los dos mapas creados en uno solo, y rotar con la opción *Trackball*.

- Finalmente, importar el *shape* de la red de drenaje a *Surfer* para agregarlas como *Basemap* y así, obtener un modelo de la topografía en 3D con sus respectivas líneas de flujo.

Para los flujos subterráneos de agua, en primer lugar, se propone crear y analizar una base de datos de los pozos que estén disponibles en el área de estudio con sus respectivas mediciones de niveles de agua, para trazar la superficie piezométrica de la cuenca. Luego, se proponer validar la piezometría mediante análisis hidroquímicos y geofísicos. El procedimiento que se propone para realizar la superficie piezométrica es el siguiente:

- Crear una base de datos con la ubicación de los pozos (coordenadas) y sus respectivos niveles de agua, así se tienen los puntos x-y-z necesarios para comenzar el modelo.
- Importar la base de datos a *Surfer*, para realizar un procedimiento similar al que se propone para los flujos superficiales. De modo que se obtendrá un mapa de contorno con las variaciones de niveles de agua. Es importante entender la información que está entregando el mapa, para este caso en específico, cada línea de contorno corresponde a una isopieza. Al agregar el mapa *3D Wireframe*, se obtendrá el modelo de la superficie piezométrica en 3D con sus respectivas isopiezas.
- Es común que existan zonas de la cuenca donde no se cuenta con información de los piezómetros, por lo que es necesario tener presente la geología de la zona para realizar una interpretación y guiar manualmente las isopiezas. Para esto se propone exportar las líneas de contorno desde *Surfer* a ArcGIS y modificar las isopiezas de acuerdo a interpretación. Además, se recomienda utilizar la herramienta *Kriging* para crear una superficie con las variaciones de los valores z (niveles de agua) y comparar ambos modelos (*Surfer* vs ArcGIS).

Según SEA (2012), para modelos de flujo, el estudio y análisis hidrogeoquímico consiste en una valiosa información complementaria, ya que permite comprender con mayor certeza las dinámicas de los flujos y su interacción, a través de las composiciones químicas de las aguas. Para este punto en específico, se propone realizar mapas de isoconcentración de elementos químicos que sean

representativos para la cuenca y ver si su distribución espacial “conversa” con la piezometría. Para crear un mapa de isoconcentración se propone el siguiente procedimiento:

- Seleccionar el elemento químico que se desea analizar espacialmente. Se recomienda elegir un anión o catión que sea representativo para la cuenca o aquel que sea de especial interés para evaluar la calidad de las aguas.
- Crear una base de datos con la ubicación de los pozos y las concentraciones del ion o catión en estudio. En este caso los valores x e y corresponden a las coordenadas y el valor z corresponde a la concentración del elemento.
- Importar la base de datos a Surfer y crear un mapa de contorno. Para este caso, las líneas de contorno representan a líneas de igual concentración del elemento químico y las perpendiculares a estas líneas podrían señalar direcciones de flujo, siempre y cuando se tenga conocimiento del comportamiento (grado de movilidad) del ión en estudio.

De igual forma, se propone utilizar perfiles de tomografía eléctrica que estén disponibles para el área de estudio, como método complementario al momento de identificar flujos de agua. Este método geofísico, permite visualizar secciones con variaciones de resistividad eléctrica en profundidad, lo que se puede traducir en variaciones de conductividad hidráulica, por lo que en conjunto con la piezometría y los análisis hidroquímicos, es posible determinar zonas en las que hay mayor acumulación de agua.

Por último, el estudio hidrogeológico enfocado en la identificación de flujos preferenciales de agua, también sirve de base para desarrollar un diseño en la propuesta de ubicación de pozos de monitoreo, ya que en ambos casos es necesario realizar un inventario de pozos, estudio piezométrico, análisis químicos y estudios con métodos geofísicos.

En los siguientes capítulos, se aplicará la metodología propuesta a los datos históricos de la cuenca Laguna Seca, describiendo en detalle las variables que permitan identificar flujos preferenciales. Se iniciará realizando una descripción de la geomorfología y geología regional y local, luego un análisis de la hidrología y las técnicas analíticas, después la caracterización del estudio hidrogeológico representado en el modelo conceptual y cómo los datos son utilizados para presentar modelos de flujos de agua, los que, finalmente, serán utilizados para crear una propuesta de monitoreo.

3. MARCO GEOLÓGICO

La cuenca Laguna Seca está ubicada en la Cordillera de Domeyko, la cual fue formada por procesos extensionales que ocasionaron el fracturamiento del basamento granítico dando origen a un sistema de cuencas y hemigraben, los que fueron rellenados con sedimentos triásicos y jurásicos. Posteriormente, procesos tectónicos compresivos originaron plegamientos de los sedimentos y una inversión de las cuencas y hemigraben, lo que se tradujo en un acortamiento en sentido EW y un alzamiento de relieve en sentido NS, conformando la Cordillera de Domeyko (Hatch, 2017).

Los rasgos estructurales que generaron la Cordillera de Domeyko están asociados al Sistema de Fallas Domeyko. Estos rasgos son características predominantes de la zona norte de Chile, con extensiones cercanas a los 1.000 km de longitud orientados NS, con componentes verticales y de cizalle. La actividad volcánica reciente y el emplazamiento de pórfidos cupríferos están relacionados con este sistema de fallas (Arcadis, 2019).

A continuación, se expondrán las características morfoestructurales y las principales unidades litológicas que se pueden encontrar en el área de estudio y sus alrededores.

3.1 GEOMORFOLOGÍA

La Región de Antofagasta tiene cinco unidades morfoestructurales principales de orientación general norte-sur y que, de oeste a este son:

Cordillera de la Costa: Con cumbres de más de 2.500 m s.n.m., tales como los cerros Paranal, Ventarrones, Armazones, Tarapacá y la más alta, Vicuña Mackenna con 3.114 m s.n.m, decreciendo su altura hacia el norte (Cerro Mulato 1.214 m s.n.m, Cerro Herradura 1.439 m s.n.m.). El ancho máximo de esta zona es de 60 km (sector del Cerro Vicuña Mackenna). Hacia el este se desarrolla la Depresión Central y al oeste está limitada por el acantilado de la costa, que en sectores sobrepasa los 1.000 m s.n.m.

Depresión Central: Presenta un relieve suave, con una clara inclinación hacia el noroeste, y alturas extremas de 1.000 y 3.200 m s.n.m. En ella se encuentran extensas llanuras como Pampa El Peñón, Pampa Providencia, Pampa Buenos Aires y Pampa Grande, entre otras.

La Cordillera de Domeyko: Corresponde a la Precordillera de la región, en la que destacan la Sierra de Argomedo (3.490 m s.n.m.), Cerros de Providencia (3.591 m s.n.m.), Cerro Pascua (2.790 m s.n.m.), Cerro Rincones (3.247 m s.n.m.), Cerro Chinchilla (3.594 m s.n.m) y el Cerro Alto de Varas (4.336 m s.n.m.).

Gran fosa prealtiplánica: Corresponde a una franja longitudinal que separa la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de Los Andes. Se destaca por la presencia de cuencas o depresiones intercordilleras, donde se desarrollan algunos depósitos salinos o salares, ejemplo de ellos es el Salar de Atacama y el Salar de Punta Negra.

Cordillera Andina: La Cordillera de los Andes se encuentra en el sector oriental de la región y en ella predomina el Altiplano o la Puna de Atacama. Se presenta alta, maciza y con marcado volcanismo, destacando los volcanes Lullailaco (6.739 m s.n.m.), Ollagüe (5.865 m s.n.m.), el Linzor (5.610 m s.n.m.) y el Licancabur (5.916 m s.n.m.), entre otros. Esta zona se caracteriza por la actividad geotérmica, que permite la formación de los géiseres del Tatio.

3.1.1 Geomorfología Local

Los principales elementos geomorfológicos del área se presentan en la Figura 4 y se describen de manera local y resumida en los siguientes puntos:

- a) Cordón montañoso ubicado hacia el este de la cuenca de rumbo preferencial NNE y altura máxima igual a 3.800 m s.n.m. aproximadamente. Constituye el límite con la cuenca pre-altiplánica del Salar de Punta Negra. Está conformado principalmente por bloques alzados del Paleozoico, los cuales ocupan un área superficial de 27 km² al interior de la cuenca (9% del área total).
- b) Cordón montañoso ubicado en el flanco oeste de la cuenca de rumbo preferencial Norte, con alturas entre los 2.950 y 3.500 m s.n.m. aproximadamente. La serie de montañas está conformada por macizos rocosos del periodo Jurásico-Triásico, y ocupan superficialmente un área de 47 km² al interior de la cuenca (16% del área total).
- c) Depresión central con una elevación media aproximada de 2.900 m s.n.m. donde se han depositado principalmente materiales coluviales de piedemonte, rellenos aluviales y depósitos evaporíticos que conforman un salar de pequeña extensión (1,8 km²). La superficie asociada a la

depresión central se estima en 186 km², lo que representa el 64% del área total de la cuenca. Superficialmente, la cuenca constituye un sistema de drenaje cerrado donde la orientación de las quebradas es aproximadamente concéntrica.

d) Hacia el borde oeste, adyacente a la cuenca, se desarrollan algunos valles y quebradas que interceptan los macizos rocosos del Paleozoico. Una de éstas se origina inmediatamente hacia aguas abajo del muro de contención y posee una orientación preferencial Noroeste en su segmento inicial.

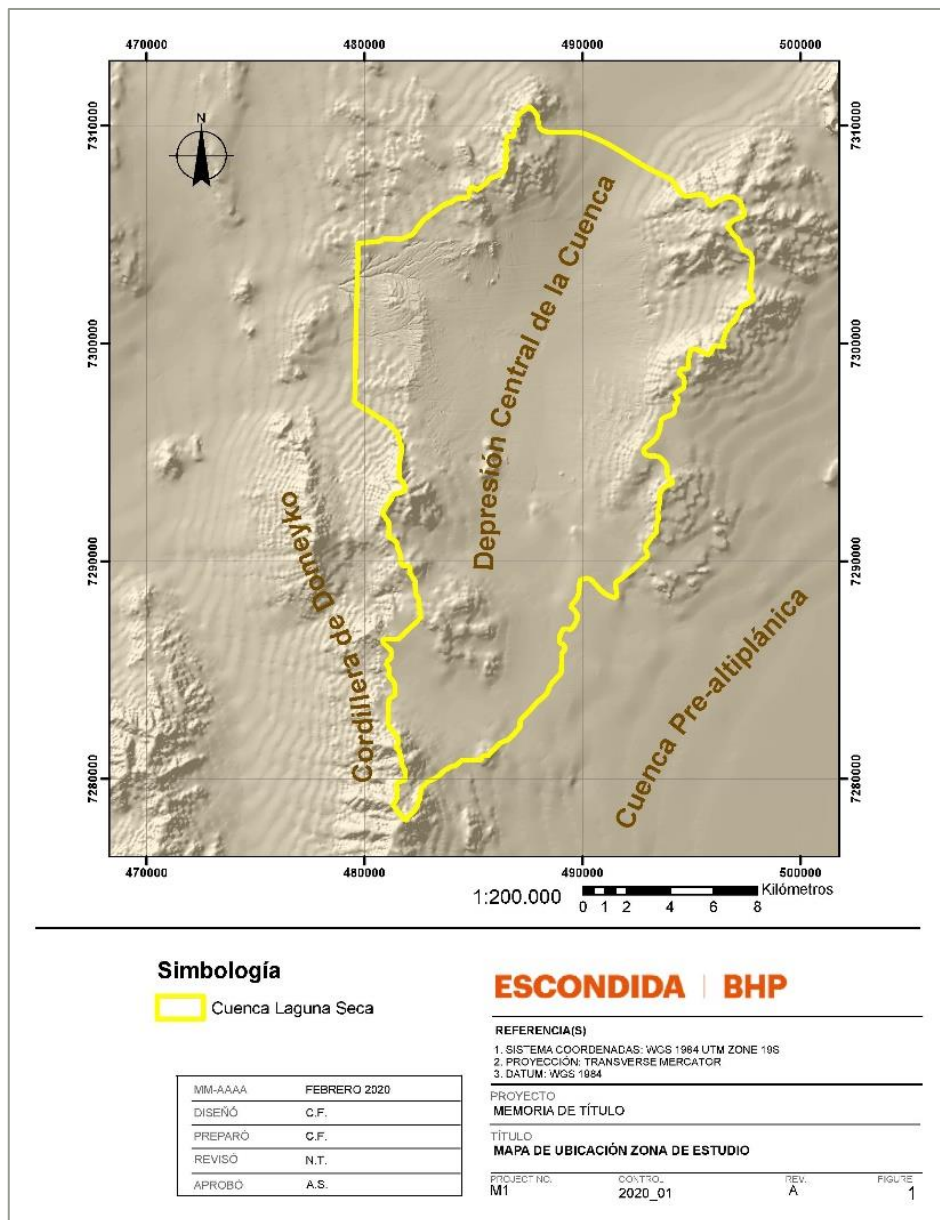


Figura 4: Mapa geomorfológico cuenca Laguna Seca.

3.2 GEOLOGÍA REGIONAL

La geología descrita en este trabajo corresponde a una compilación de la información contenida en seis cartas geológicas que rodean al área de estudio (Figura 5), Aguas Blancas (Marinovic y otros, 1995), Augusta Victoria (Maksaev y otros, 1991), Imilac-Quebrada Guanaqueros (Solari y otros, 2017), Los vientos (Espinoza y otros, 2012), Sierra de Varas (González y otros, 2015), Salar de Punta Negra- Cerro Sur Bayo (Villa y otros, 2019) como base de la información geológica; además se utilizó el Mapa Geológico de Chile escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003) para complementar información. En el área de estudio afloran rocas del basamento (Paleozoico) y cobertura (Mesozoico-Cenozoico) del orógeno andino. El basamento está constituido por rocas sedimentarias marinas y complejos intrusivos asociados a secuencias volcánicas del Paleozoico Superior. La cobertura mesocenozoica incluye secuencias volcanosedimentarias, sedimentarias marinas y volcánicas, asociadas y, en parte, intruidas por plutones de la misma edad.

3.2.1 Paleozoico

Formación Argomedo (Devónico superior – Carbonífero inferior)

Esta unidad fue reconocida por primera vez por Breitreuz (1986, en Marinovic y otros, 1995) en Sierra de Argomedo. Corresponde a una secuencia de aproximadamente 1.200 m de lutitas y limolitas silíceas oscuras alternadas con grauvacas, areniscas con fauna fósil marina (Devónico-Carbonífero) y material volcánico. La base de esta unidad no aflora en el área y su techo corresponde a la discordancia angular y de erosión que la separa de la Formación La Tabla. Además, se encuentra intruida por varios cuerpos tonalíticos y monzograníticos del Paleozoico Superior que alcanzan gran desarrollo hacia la parte suroccidental de esta sierra.

Formación La Tabla (Carbonífero – Pérmico)

Esta unidad fue definida por García (1967) como una secuencia volcánica principalmente silícea. En la Hoja Aguas Blancas (Marinovic y otros, 1995), Formación La Tabla está constituida por lavas y tobas riolíticas, y subordinadamente por andesitas. Su base aflora sólo en el núcleo de la Sierra Aspera, donde sobreyace en discordancia angular a la Formación Argomedo. Su techo corresponde al contacto erosivo que la separa de las formaciones sedimentarias de edad triásica superior y liásica.

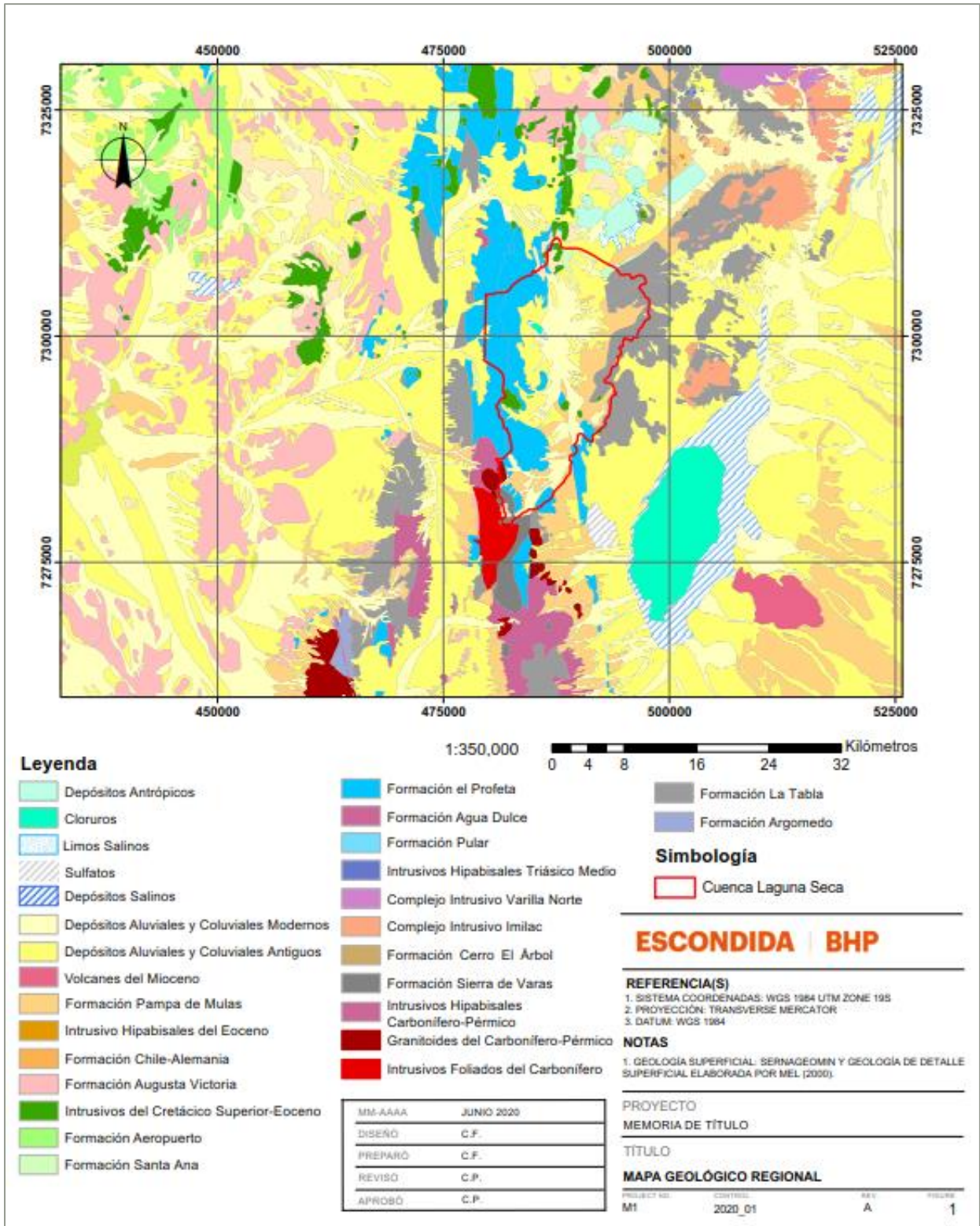


Figura 5: Mapa con litologías principales de la geología regional (Modificado de Marinovic y otros, 1995).

Intrusivos Foliados del carbonífero (Carbonífero superior)

Unidad definida por (Smoje & Marinovic, 1994), como una unidad de granodioritas de biotita y tonalitas de hornblenda y biotita. Según Marinovic y otros (1995) se exponen en la vertiente occidental de la Sierra de Varas, y corresponden a granitoides leucocráticos a mesocráticos de grano medio a grueso que exhiben un característico bandeamiento sinmagmático. La composición de estas rocas varía desde dioritas a sienogranitos, constituyendo las tonalitas de biotita y hornblenda y las granodioritas de dos micas, los tipos litológicos predominantes.

Granitoides del Carbonífero-Pérmico

Marinovic y otros (1995) incluyen en este grupo una serie de plutones de grano grueso, de amplio rango composicional, pertenecientes a dos complejos intrusivos (Argomedo y Sierra de Varas) del Carbonífero Superior y Pérmico, respectivamente, los cuales afloran en las sierras del mismo nombre. El Complejo Intrusivo de Argomedo constituye un núcleo multiplutónico independiente, rodeado por rocas hipabisales y por productos efusivos, probablemente cogenéticos. El Complejo de Sierra de Varas agrupa a pequeños 'stocks' dispersos a lo largo de la sierra.

Intrusivos Hipabisales Carbonífero-Pérmico

Afloran a lo largo de la Sierra de Varas, constituyendo el tipo litológico más abundante (Marinovic y otros, 1995). También aparecen expuestos en la Sierra de Providencia, donde están estrechamente relacionados con rocas de la Formación La Tabla. Macroscópicamente se distinguen dos tipos litológicos principales: pórfidos riolíticos a dacíticos gris verdosos y pórfidos riolíticos rojos.

Formación Sierra de Varas (Carbonífero – Pérmico)

Definida por Marinovic y otros (1995) como un conjunto de rocas calcáreas, calcáreo-pelíticas y silicoclásticas de carácter continental que aflora en los alrededores del Portezuelo de Varas, en la Cordillera de Domeyko. Contiene calizas y 'chert' con niveles coquinoideos, lutitas, limolitas, y areniscas fosilíferas de origen lacustre del Carbonífero-Pérmico, con intercalaciones de conglomerados y tobas que alternan con brechas volcánicas e ignimbritas. Sobreyace con discordancia de erosión a pórfidos dacíticos subvolcánicos del Carbonífero-Pérmico y hacia el techo engrana gradualmente con rocas volcánicas de la Formación La Tabla.

Formación Cerro El Árbol (Pérmico inferior)

Definida por Marinovic y otros (1995) como 130 metros aproximadamente de brechas conglomerádicas y areniscas arcósicas y calcáreas, lutitas rojas, areniscas con intercalaciones de riolitas, lutitas y bancos de calizas coquinoídeas con fósiles marinos del Pérmico Inferior. Esta unidad se apoya sobre rocas volcánicas de la Formación La Tabla. Su techo corresponde al contacto discordante con rocas sedimentarias marinas triásicas de la Formación Profeta.

Complejo Intrusivo Imilac (Pérmico inferior):

Es definido por Urzúa (2009) y redefinido por Solari y otros (2017). Consiste en dioritas, monzogranitos, granodioritas de biotita, anfíbol y piroxeno, granodioritas de anfíbol y biotita, granitos de biotita, metatonalitas, metadioritas, dioritas y andesitas. Intruyen a la Formación Zorritas y a la Formación Agua Escondida. Está cubierto, en inconformidad, por unidades volcánicas y sedimentarias del Oligoceno-Pleistoceno. Villa y otros (2019) obtienen una edad U-Pb en circones de $291,1 \pm 1,9$ Ma.

3.2.2 Mesocenoico

Complejo Intrusivo Varilla Norte (Triásico Medio – Superior)

Definido en la carta de Imilac–Quebrada Guanaqueros (Solari y otros, 2017) como cuerpos intrusivos de variada composición. Granodioritas y monzogranitos de anfíbola y biotita; tonalitas de anfíbola acicular; monzogranitos y, en menor proporción, granodioritas de biotita. Además, se describen stocks y diques riolíticos.

Intrusivos Hipabisales del Triásico medio

Corresponden a stocks y diques riolíticos (Solari y otros, 2017), compuestos por rocas de color gris claro a rosáceos de textura porfírica, con fenocristales de plagioclasa sericitizados y cuarzo subhedral, feldespato alcalino argilizado y microfenocristales de anfíbola. La masa fundamental está formada por cuarzo, calcedonia, feldespato alcalino y minerales opacos.

Formación Pular (Triásico Medio – Superior)

Definida en la Carta Geológica Imilac- Quebrada Guanaqueros (Solari y otros, 2017) como una secuencia de lavas volcánicas y rocas volcanosedimentarias. Se divide en tres miembros de la siguiente forma:

Miembro Superior: Sucesión de rocas volcánicas, con una potencia de ca. 400 m de lavas andesíticas con texturas porfídica, autobrechas andesíticas y lavas porfídicas, andesíticas amigdaloidales rellenas con calcedonia, Illita, hematita, hidróxidos de hierro y calcita.

Miembro Medio Sucesión de rocas sedimentarias y volcánicas, con una potencia de ca. 660 m, compuestas por conglomerados violáceos, gruesos y clasto soportados; conglomerados grises y matriz soportados; areniscas medias a gruesas con estratificación cruzada en artesa, lutitas negras, bituminosas con intercalaciones de fangolitas, limolitas y estromatolitos; areniscas gruesas y conglomerados tobáceos, tobas de ceniza y lapilli vítreas y lítico-cristalinas, de colores rojizos a gris verdoso. En algunos sectores, se intercalan en la sucesión lavas basálticas de olivino.

Miembro Inferior: Sucesión volcánica y sedimentaria estratificada constituida por estratos métricos de lavas andesítico-basálticas y brechas andesíticas. Se intercalan en la sucesión, estratos subordinados de conglomerados volcanolíticos, areniscas epiclásticas y tobas de ceniza.

Formación Agua Dulce (Triásico Superior)

García (1967) denominó Formación Agua Dulce a una secuencia volcánica y sedimentaria, que aflora en la sierra del mismo nombre, por correlación con otros afloramientos de similar litología (Cerros de Caracoles y Moctezuma) que infrayacen al Jurásico. Litológicamente corresponde a una secuencia de reducido espesor (80-100 m) de rocas volcanoclásticas y sedimentarias de origen continental con intercalaciones calcáreas fosilíferas del Triásico Superior.

Formación El Profeta (Triásico Superior - Jurásico)

La Formación Profeta está constituida por un potente conjunto de rocas sedimentarias marinas calcáreas, siliciclásticas y evaporíticas, con fósiles que indican un rango de edad variable entre el Triásico Superior y el Kimmeridgiano, expuestas a lo largo de la Cordillera de Domeyko. Esta unidad fue definida por Chong (1973) quien la subdividió originalmente en 8 miembros. Estos

fueron redefinidos posteriormente en una serie de estudios de detalle efectuados por distintos autores (Bogdanic y Chong, 1985; Bogdanic et al., 1985; Chong y von Hillebrandt, 1985; Fuenzalida, 1986; Padilla, 1988 en Marinovic y otros, 1995).

Formación Santa Ana (Jurásico Superior – Neocomiano)

Esta unidad fue definida por Naranjo & Puig (1984 en Marinovic y otros, 1995) como una secuencia de origen marino-continental con intercalaciones volcánicas andesíticas, que aflora en la Sierra Santa Ana. Las mejores exposiciones de esta unidad se presentan en el acceso oriental del Portezuelo de la Sal y en la parte norte de la Quebrada Profeta Marinovic y otros (1995), donde aflora una secuencia de aproximadamente 500 m de areniscas calcáreas coquinoideas fosilíferas, areniscas finas y limolitas rojas, con fauna fósil del Jurásico Superior- Neocomiano. Esta formación se apoya con contacto concordante y transicional sobre los niveles superiores de la Formación Profeta y está cubierta con fuerte discordancia angular por rocas volcánicas de la Formación Augusta Victoria, o por gravas de la Formación Pampa de Mulas.

Formación Aeropuerto (Cretácico Inferior)

Se denomina Formación Aeropuerto (Ulriksen, 1979), “a una secuencia volcanoclástica con intercalaciones de rocas sedimentarias continentales y marinas”, cuyo lugar tipo es el Aeropuerto Las Breas de Taltal. Ulriksen (1979) distinguió dos miembros en la unidad; Naranjo y Puig (1984 en Marinovic y otros, 1995) redefinieron la formación eliminando la subdivisión y le asignan una distribución areal más amplia. Marinovic y otros (1995) la definen como una secuencia de aproximadamente 150 m de conglomerados, areniscas gruesas y brechas volcánicas andesíticas con escasas intercalaciones de riolacitas. La unidad se dispone en discordancia angular y de erosión sobre la Formación Profeta e infrayace en discordancia angular a la Formación Augusta Victoria.

Intrusivos del Cretácico Superior - Eoceno

Corresponden a diversos 'stocks' con edades comprendidas entre los 77 y 42 Ma, que afloran en la Cordillera de Domeyko, así como en serranías y cerros islas de la Depresión Intermedia. Se presentan generalmente asociados con volcanitas de la Formación Augusta Victoria, con las cuales se les considera, en sentido amplio, genéticamente relacionados. Intruyen, además, a secuencias volcánicas y sedimentarias del Jurásico, Cretácico Inferior y Cretácico Superior. La amplia gama

composicional de estos intrusivos incluye desde pórfidos riolíticos hasta gabros, siendo los términos dioríticos y monzodioríticos los predominantes. Las relaciones de contacto entre estas diferentes facies son gradacionales o intrusivas (Boric y otros, 1990 en Marinovic y otros, 1995), lo que evidencia que estos cuerpos se emplazaron en diversos pulsos de intrusión.

Las rocas que constituyen esta unidad se han agrupado en siete asociaciones litológicas principales: Dioritas y en menor proporción monzodioritas y gabros; Pórfidos monzoníticos, monzodioritas y monzogranitos; Granodioritas; Gabros; Pórfidos andesíticos; Aplitas riolíticas-dacíticas y Granitos (Marinovic y otros, 1995).

Formación Augusta Victoria (Cretácico Superior – Eoceno)

La Formación Augusta Victoria fue definida por García (1967) en los alrededores de la estación del mismo nombre del Ferrocarril de Antofagasta a Socompa, como una secuencia constituida por lavas de color gris y pardo rojizo, y por tobas y brechas tobíferas de color gris claro y blanco. Marinovic y otros (1995) describen esta formación como una secuencia de más de 1.000 m de lavas, tobas, brechas y aglomerados volcánicos de composición basáltica a riolítica, domos y pequeños 'stocks' hipabisales con edades radiométricas K-Ar en el intervalo Cretácico Superior-Eoceno. La unidad sobreyace en discordancia angular a rocas de la Formación Santa Ana y a la Formación Aeropuerto e infrayace en discordancia angular y de erosión, a la Formación Pampa de Mulas

Formación Chile-Alemania (Paleoceno Superior)

Definida por Solari y otros (2017) como una secuencia de tobas de ceniza y de lapilli de color gris-pardo a amarillento-anaranjado, correspondiente a tobas de ceniza de líticos, líticos y cristales y/o vitroclastos; y andesitas y dacitas gris-verdosas con textura porfídica, localmente autobrechizadas.

Intrusivos Hipabisales del Eoceno (Eoceno medio - superior)

Solari y otros (2017) describen esta unidad como dacita de anfíbola (-biotita) de tonalidad blanquecina, textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa. Andesitas de anfíbola (-piroxeno) de tonalidades negruzcas, de textura porfírica y grano fino, con fenocristales de plagioclasa. Además, se incluyen brechas hidrotermales de coloración blanquecinas a pardo-anaranjadas de

textura brechosa, clasto-soportadas y con mala selección, con fragmentos de tamaños milimétricos a centimétricos, correspondientes a dacitas porfídicas.

Pórfidos Cupríferos Oligocenos

Marinovic y otros (1995) describen esta unidad como un complejo intrusivo hipoabisal de composición intermedia a ácida, al cual se asocia la alteración hidrotermal y la mineralización de los yacimientos La Escondida y Zaldívar.

Formación Pampa de Mulas

Chong (1973) define esta formación como “brechas y conglomerados depositados en avenidas torrenciales” en ambiente semiárido durante el Oligoceno-Mioceno. Se distribuye en abanicos aluviales que son parte del relleno de la depresión preandina y las cuencas intramontanas de las sierras de Imilac y Almeida. Solari y otros (2017) definen esta formación como una sucesión sedimentaria compuesta por conglomerados, areniscas conglomerádicas y areniscas mal seleccionadas, inmaduras, textural y composicionalmente, clasto a matrizsoportadas.

Volcanes del Mioceno

Consisten en estratovolcanes con formas cónicas preservadas, domos exógenos, coladas de lava, depósitos piroclásticos y de avalancha volcánica. Se encuentran en el frente occidental del arco volcánico y se incluyen los volcanes Guanaqueros, Iris, Silla, Cerro del León, Punta Negra, Sur Bayo, Oriente Guanaqueros, Inca, Zorritas, Esperanto, Los Asperos, Provenir, Pedregal, Corrida de Cori Norte y complejo volcánico Cordón de Aguas Calientes. Sobreyacen a las formaciones Agua Escondida, Pampa de Mulas, Ignimbritas Tocomar, Río Frío y Zorritas. Están cubiertos por los depósitos aluviales y coluviales antiguos y recientes. Villa y otros (2019) obtienen edades $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ en lavas, tanto en masa fundamental como en anfíbolos, resultando edades del Mioceno al Plioceno.

Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno)

Depósitos sedimentarios poco consolidados distribuidos en toda el área de la carta y provenientes de la erosión de las unidades anteriores, han sido divididos en dos unidades según su edad máxima:

Depósitos Aluviales y Coluviales del Mioceno-Plioceno, y Depósitos Aluviales y Coluviales del Pleistoceno-Holoceno (Villa y otros, 2019).

Depósitos aluviales y coluviales del Mioceno-Pleistoceno: Descritos por Solari y otros (2017) como depósitos de gravas, arenas, limos y arcillas, con intercalaciones de tobas de ceniza que forman llanuras, conos y abanicos aluviales. En las zonas proximales de los abanicos y conos, están compuestos por gravas polimícticas, textural y composicionalmente inmaduras y mal seleccionadas, que presenta un cambio gradual a arenas finas a gravosas, limos y arcillas hacia la porción más distal de las llanuras, conos y abanicos.

Depósitos Aluviales y Coluviales del Pleistoceno superior-Holoceno: Descritos por Solari y otros (2017) como depósitos no consolidados de gravas, arenas gravosas, arenas, limos y arcillas. Son polimícticos, mal seleccionados, textural y composicionalmente inmaduros, clasto a matriz soportados, con clastos de hasta 400 cm, subredondeados a angulosos, con mala esfericidad. Se disponen en estratos macizos de espesor métrico a milimétrico, con estratificación paralela, cruzada, y en sectores, con grietas de desecación, marcas de impacto por gotas de lluvia y cementados por carbonatos o sulfatos. La edad es acotada por dataciones de C14 en restos orgánicos intercalados en estos depósitos, con resultados de 9,5 y 13,8 Ka (Quade y otros, 2008) y por su intercalación con el volcán Llullaillaco (Villa y otros, 2019.).

Depósitos Salinos (Pleistoceno – Holoceno)

Descritos por Solari y otros (2017) como una serie de depósitos asociados a salares en la depresión preandina y cuencas intramontana, los cuales varían según su composición:

Sales de sulfatos: Precipitados que conforman costras, eflorescencias, capas de yeso granular y prismático. Están alternados con láminas de limo de anhídrita de color pardo-claro a blanco.

Sales de cloruros: Costras y precipitados de cloruros constituidos por halita y polihalita granular, con yeso accesorio.

Depósitos de arcillas y limos salinos: Contienen diatomeas, son ricos en restos vegetales y materia orgánica; intercalados en depósitos de limos arenosos, lentes de arena y arcillas.

Depósitos Antrópicos (Holoceno)

Solari y otros (2017) señalan como depósitos antrópicos a la acumulación de sedimentos asociados a la industria minera. Corresponden a pilas de lixiviación compuestas por mineral triturado de granulometría tamaño grava, en proceso de lixiviación para recuperar cobre y a las pilas de botaderos de material estéril.

3.3 GEOLOGÍA LOCAL

La cuenca Laguna Seca se encuentra ubicada en el borde occidental de la Cordillera de Domeyko, en un contexto geológico de subducción, donde las unidades dominantes del sector son de carácter ígneo y volcanosedimentarias, cuyas edades varían desde el período Paleozoico al Cenozoico. Estas unidades están cubiertas por sedimentos más recientes, de hasta 200 metros de potencia, donde es posible distinguir depósitos aluviales, coluviales y salinos del período Terciario a Cuaternario. La Figura 6 muestra su distribución en el entorno de la cuenca Laguna Seca. Este mapa se ha construido en base a información geológica de SERNAGEOMIN, las cartas geológicas mencionadas en contexto regional y Urzúa (2009) para el trazado de estructuras aproximado, geología de detalle superficial elaborada por Escondida en el año 2000, en el sector suroeste de la cuenca y modificado de Golder (2018).

3.3.1 Rocas Estratificadas

Formación La Tabla (Carbonífero-Pérmico, Pzlt): Esta unidad fue definida por García (1967) a la latitud del Salar de Pedernales (26°10' S). Corresponde a una secuencia volcánica continental formada por lavas, domos, tobas y brechas andesíticas a riolíticas con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas, la secuencia define estratos que han sido deformados desarrollando pliegues abiertos con longitudes de ondas de escala kilométrica (García, 1967). También, incluye intrusivos hipabisales riolíticos a dacíticos de coloración rojizo-marrón, con textura porfídica de grano medio, compuesta por fenocristales de feldespatos potásico, plagioclasas; cuarzos, anfíbolos tabulares y pseudomorfos de piroxenos.

La unidad se alza en bloques que conforman los cordones montañosos principalmente en el borde este del sitio de estudio. Se estima que la unidad podría alcanzar espesores de hasta 800 m-1000m (Marinovic y otros, 1995).

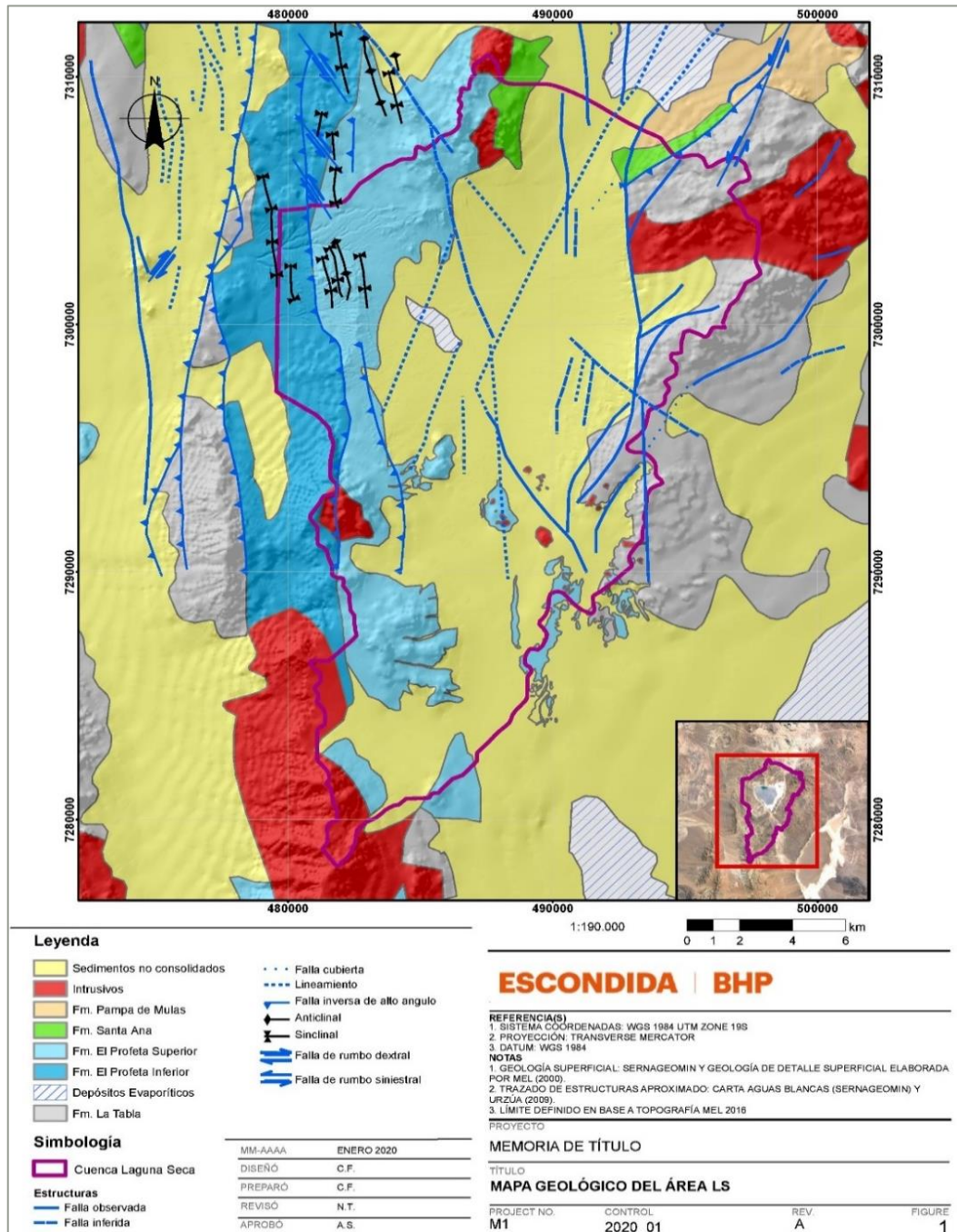


Figura 6: Mapa geología local cuenca Laguna Seca (Modificado de Golder, 2018).

La formación ha sido descrita para muchas localidades a lo largo de la Cordillera de Domeyko. La base de esta unidad no está expuesta en el área de estudio, sin embargo, una leve discontinuidad angular separa a esta formación de la subyacente Formación Zorritas en la Sierra de Almeida, 60 km al este del distrito Escondida (Niemeyer y otros, 1985; Urzúa, 1988 en Urzúa, 2009)

Formación El Profeta (Triásico-Jurásico, Tr-J): Corresponde a una sucesión de calizas, areniscas y lutitas calcáreas, que sobreyace en discordancia a la Formación La Tabla, se estima que la unidad posee un espesor máximo de 1.500 m (Chong, 1973). Aflora hacia el sector oeste del de la cuenca Laguna Seca. Se distinguen dos miembros principales en la unidad:

- Miembro Inferior (TrJ1m; Triásico-Jurásico Inferior), el cual se compone de areniscas cuarcíferas, conglomerados, calizas fosilíferas, lutitas calcáreas con intercalaciones volcánicas subordinadas.
- Miembro Superior (J1m; Jurásico-Neocomiano) compuesto de intercalaciones de calizas, areniscas, lutitas y yeso. Se estima que el espesor de esta unidad puede alcanzar los 700 m.

Formación Santa Ana (Jurásico-Cretácico, JKsa): Comprende una secuencia sedimentaria transicional, con intercalaciones de lavas, brechas y tobas andesíticas. Subyace de manera concordante a la Formación El Profeta. Sus afloramientos se ubican en la parte norte de la cuenca en estudio y son de extensión reducida (Marinovic y otros, 1995).

Formación Pampa de Mulas (Terciario, LTpm): Corresponde a una formación sedimentaria continental de gravas polimícticas, brechas y arenas gravosas pobremente consolidadas, en la que se reconocen además intercalaciones de ceniza, yeso y limos. La unidad se distribuye mayormente hacia el sector este y oeste al pie de las altas cumbres de la Cordillera de Domeyko. Se estima que el espesor máximo de la unidad es del orden de 300-350 m (García, 1967).

Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno, M1c, MP1c, Qa): Materiales de relleno han sido depositados extensamente en la cuenca Laguna Seca, los cuales corresponden a rellenos aluviales no consolidados del periodo pleistoceno-holoceno (Qa) y a rellenos coluviales depositados en el Mioceno (M1c) y entre el Mioceno-Superior y Plioceno (MP1c). En conjunto estos materiales representan un 63% de la superficie de la cuenca Laguna Seca. Los materiales aluviales, formados de gravas, arenas y limos, se ubican principalmente en el sector central y sur de la cuenca. Subyaciendo a esta unidad se localizan materiales coluviales modernos, los cuales afloran principalmente al pie de los cordones montañosos que flanquean la cuenca por el su lado este y oeste (Marinovic y otros, 1995).

3.3.2 Rocas Intrusivas

Rocas intrusivas (CPg, Ksg, Eg): Se reconoce un conjunto de rocas intrusivas con presencia intermitente en la zona de estudio. Las más frecuentes consisten en granodioritas, dioritas y monzodioritas, además de pórfidos dacíticos y riolíticos del Eoceno (Eg), los cuales se distribuyen hacia los sectores central y norte de la cuenca asociada al TLS. En menor frecuencia afloran intrusivos más antiguos del periodo cretácico superior (Ksg) y carbonífero-pérmico (CPg).

3.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En el contexto de la hidrogeología, las rocas afectadas por estructuras geológicas, se agrupan ampliamente bajo el término de rocas fracturadas, las distintas estructuras que afectan a las rocas podrían modificar su permeabilidad inicial, es así como las rocas pueden adquirir una permeabilidad de moderada a buena debido a las fracturas (UNESCO-IAHS, 1967 en Singhal & Gupta, 2010), de ahí la importancia de identificar zonas de debilidad estructural en las unidades de roca.

3.4.1 Geología Estructural Regional

En la región de Antofagasta cuenta con dos grandes sistemas estructurales: Sistema de Fallas de Atacama (SFA), formado en el Jurásico como una zona de cizalle dúctil y reactivado como una zona de falla transcurrente de dominio frágil en el Cretácico y Terciario; y el Sistema de Fallas de la Cordillera de Domeyko (SFCD) caracterizado por un sistema de deformación transcurrente, de dominio frágil de magnitud regional desarrollado a partir del Eoceno en la Fase Tectónica Incaica; la zona de estudio se encuentra directamente afectada por este último sistema estructural.

3.4.2 Geología Estructural Local

El Sistema de Fallas de la Cordillera de Domeyko tiene un rumbo general paralelo a la fosa chileno-peruana en el norte de Chile, de la cual dista unos 150 km al interior del continente, por lo cual puede clasificarse como una 'trench-linked fault' según la terminología de Woodcock (1986 en Niemeyer & Urrutia, 2009). Se considera relacionado con un importante componente de transpresión ocurrido durante el Eoceno tardío-Oligoceno a lo largo de sus principales fallas (Mpodozis y otros, 1993; Maksaev & Zentilli, 1999 en Niemeyer & Urrutia, 2009). Este sistema

de fallas habría favorecido el emplazamiento de los megapórfidos cupríferos oligocenos presentes en el norte de Chile, entre ellos, Escondida, Chuquicamata, Zaldívar, El Salvador y El Abra.

Para identificar la configuración estructural del área de estudio, se trabajó con un modelo de elevación digital en el software ArcGIS, utilizando la herramienta Hillshade, esta permite identificar lineamientos de forma manual y al comparar el resultado con imágenes satelitales que permiten identificar los cambios litológicos, se pueden interpretar algunos lineamientos como fallas. La Figura 7 corresponde al mapa estructural del área de estudio, realizada mediante interpretación, en conjunto con información geológica de Golder (2018) y Urzúa (2009).

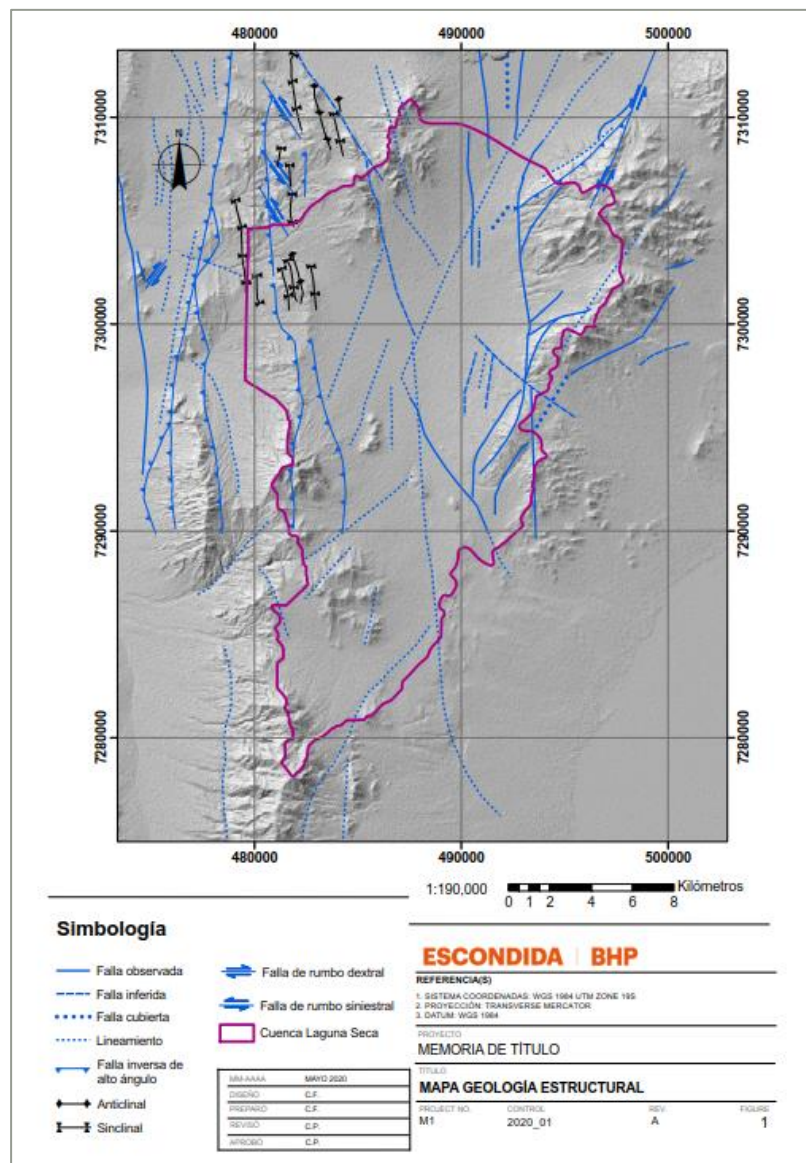


Figura 7: Geología estructural del área de estudio.

Adicionalmente, se muestra la Figura 8 que expone el sistema estructural y posición de las unidades que se encuentran en el área en estudio dentro del que se destaca (Golder, 2018):

- La Falla Escondida con un rumbo predominante N, localizada hacia el este.
- La Falla Sierra de Varas, localizada hacia el oeste, con un rumbo predominante NNW.

Entre ambos elementos se define un área con un alto nivel de deformación y se generan bloques estructurales que generan cambios horizontales y en superficie de las unidades litológicas cuyos principales elementos estructurales son los siguientes:

- Intenso plegamiento de la formación El Profeta (miembros superior e inferior) dada por una serie de anticlinales y sinclinales con una orientación de eje axial predominante NNW y NW.
- Conjunto de fallas inversa, como la estructura regional que pone en contacto los miembros inferior y superior de la formación El Profeta ubicada hacia el oeste de la cuenca Laguna Seca.
- Falla Escondida que produce el alzamiento de unidades del periodo paleozoico correspondientes a la Formación La Tabla en el sector este.
- Estructuras subordinadas dadas por fallas de rumbo siniestral y dextral de dirección preferencial NW y NE, producidas en respuesta al esfuerzo compresional dominante durante la Fase Tectónica Incaica (Urzúa, 2009), estas estructuras deberían corresponder a fallas de alto ángulo.

Los sistemas estructurales presentados en la Figura 8 permiten además reconocer la compartimentalización de las unidades geológicas a nivel de la cuenca. Estos compartimientos o bloques se caracterizan por:

Bloque 1: es limitado por dos fallas inversas conjugadas que permiten el levantamiento del bloque. Es el único compartimento donde se reconoce la Formación Santa Ana.

Bloque 2: limitado por fallas inversas de rumbo y manteo similares que producen un levantamiento de este bloque en comparación a los ubicados al este del mismo. Esto permite el afloramiento del Miembro Inferior de la Formación El Profeta y desconecta lateralmente los miembros de la misma formación.

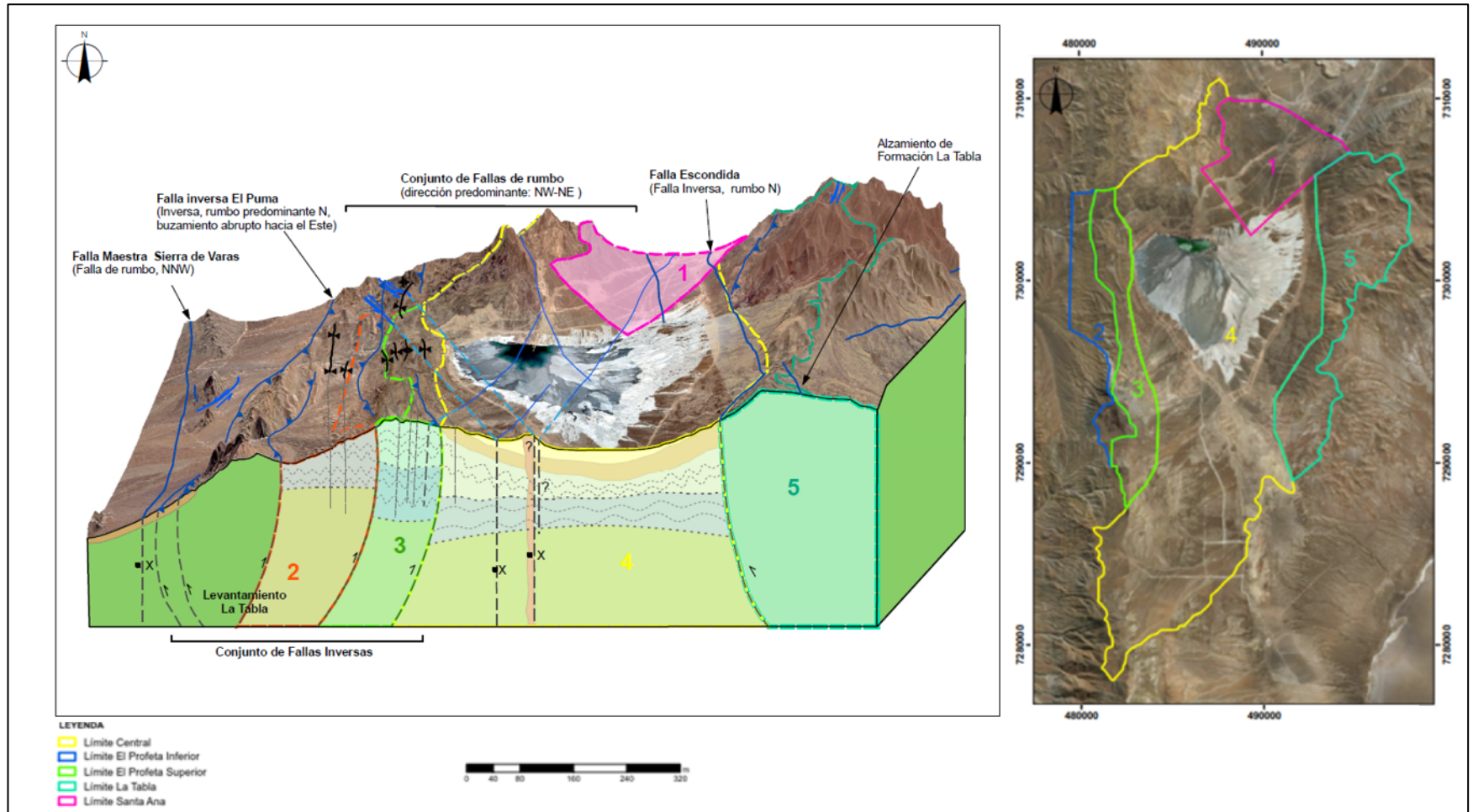


Figura 8: Modelo de bloques y configuración estructural de la cuenca Laguna Seca (Golder, 2018).

Bloque 3: también limitado por fallas inversas de rumbo y manteo similares, las generan en levantamiento de este bloque respecto al Bloque 4. Producto de esta situación, la Formación El Profeta se desconecta parcialmente.

Bloque 4: limitado por fallas inversas de similar rumbo, pero sentido de manteo opuesto, que se traduce en un hundimiento del bloque en comparación a los bloques contiguos. En este se reconoce la secuencia estratigráfica completa de la Formación El Profeta, la que es sobreyacida por depósitos coluviales y aluviales. La cuenca LS se ubica sobre los depósitos no consolidados de este bloque.

Bloque 5: este corresponde en su totalidad a la Formación La Tabla, la cual fue levantada por una falla inversa (Falla Escondida) que limita con el Bloque 4.

Finalmente, se presenta el modelo de bloques geológico para la cuenca Laguna Seca (Figura 9) creado por Golder (2018) con el *software Leapfrog*, el cual es una simplificación de todos los componentes geológicos presentes en el área de estudio.

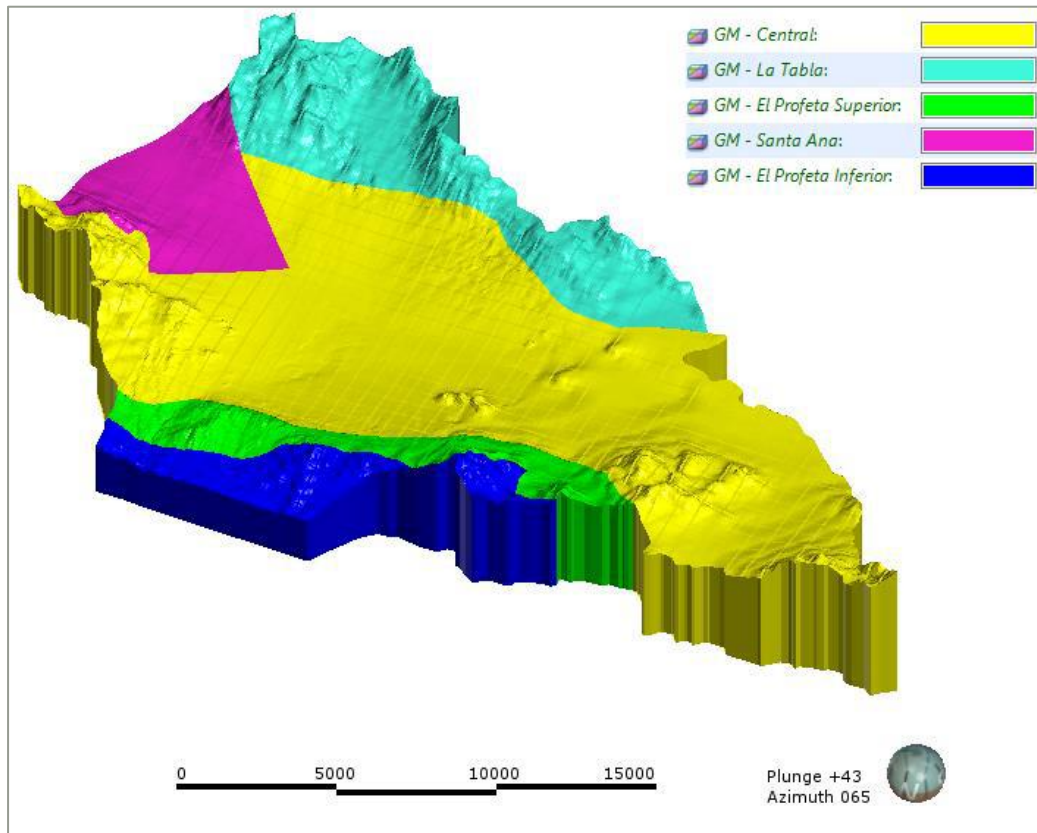


Figura 9: Modelo de bloques creado en *Leapfrog* para la cuenca LS (Golder, 2018).

4. HIDROLOGÍA

Los procesos hidrológicos corresponden a todos aquellos procesos ocurridos en superficie (precipitación y evaporación), ya que estos constituyen recargas y descargas de los sistemas de acuíferos, respectivamente. En este contexto, como parte de cualquier modelación hidrogeológica es necesario caracterizar el comportamiento de las variables hidrológicas más importantes y comprender cuál es su relación con el sistema del acuífero modelado.

Se debe tener en consideración que la recarga, que es dependiente de la precipitación, se podría ubicar en zonas alejadas del área de emplazamiento del proyecto, lo cual es particularmente común en zonas del norte de Chile (SEA, 2012). Actualmente, la forma más simple y eficaz de trazar las cuencas hidrográficas es a través de un software especializado, el cual, a partir de un modelo de elevación digital (DEM), delimita la red de drenaje de una zona y las hoyas hidrográficas asociadas. Los DEM están disponibles gratuitamente en la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) o mediante descarga directa con el software *Globalmapper*. Las resoluciones de los modelos de elevación digital en general son suficientes para la mayoría de los modelos hidrológicos, no obstante, si se requiere analizar cuencas pequeñas y se cuenta con topografía de detalle, éstas pueden ser trazadas gráficamente con mayor precisión.

4.1 RED HIDROGRÁFICA

Una red hidrográfica es un sistema de circulación lineal, jerarquizado y estructurado que asegura el drenaje de una cuenca; específicamente una cuenca hidrográfica. Los patrones o geometrías de las redes de drenaje son el resultado no sólo de la dinámica fluvial sino también de la resistencia a la erosión y disposición de las diferentes litologías del terreno y del ordenamiento de las estructuras de deformación tectónicas de la superficie terrestre, ya sean, diaclasas, fallas y/o pliegues (Burbank & Anderson, 2001).

Para delimitar una cuenca hidrográfica se procede a determinar el drenaje de la cuenca y definir el perímetro de acuerdo a la línea divisoria de aguas, utilizando curvas de nivel o relieve y/o la red hidrográfica.

Para el área de estudio, se utilizó el software *GlobalMapper* para descargar un DEM del área de estudio y realizar la red de drenaje, la cual es exportada como *shapefile* a ArcGIS, donde se realizan

ajustes a las polilíneas con ayuda de imágenes satelitales. Una vez determinada la red de drenaje para toda la cuenca, se procede a definir los límites de la cuenca Laguna Seca, marcados en morado en la Figura 10.

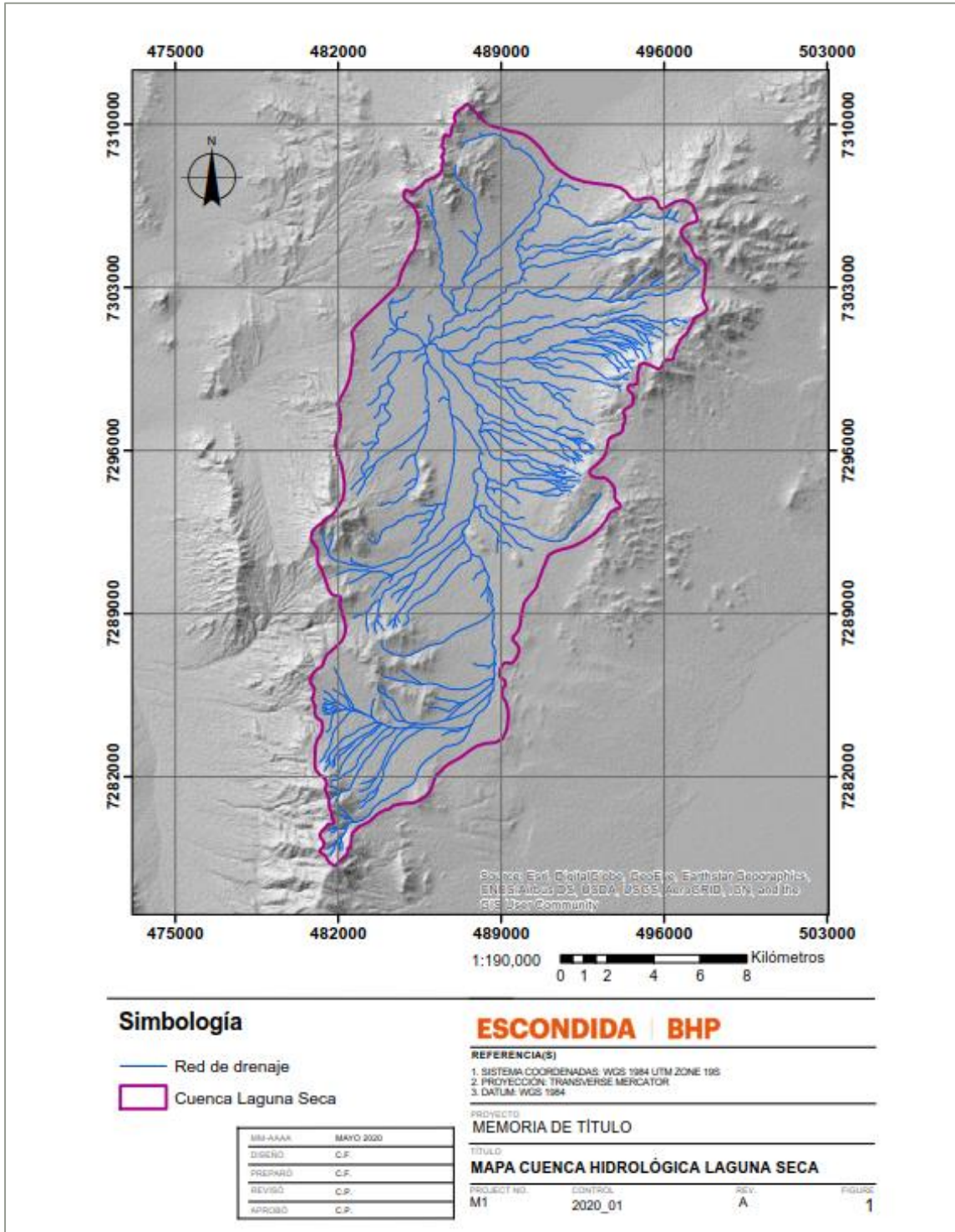


Figura 10: Red hidrográfica para cuenca Laguna Seca.

De manera generalizada, la cuenca hidrológica LS presenta una geometría de tipo subdendrítica a subparalela que converge en un punto central, tiene una forma alargada en la NS con una inclinación N20°E (noreste-suroeste) aproximadamente. Sin embargo, la mayoría de las líneas de flujo de agua superficial tienen una orientación E-W, llegando a una línea central de flujo de orientación NS y/o directamente al punto de convergencia en la parte superior de la cuenca.

Además, es posible señalar que la Figura 10 muestra la red de drenaje de la cuenca Laguna Seca, como una respuesta a la dinámica fluvial, la que a su vez está estrechamente relacionada con la geología y el sistema estructural presentes en el área de estudio.

4.2 CLIMATOLOGÍA

Las características climáticas de la Región de Antofagasta son de una marcada aridez. El desierto se manifiesta plenamente hacia la zona intermedia, donde la influencia marítima, propia del relieve, pierde importancia. La situación de extrema aridez en la Depresión Intermedia y la escasa vegetación existente definen un paisaje natural conocido como Desierto de Atacama. En esta región se localizan cuatro subtipos climáticos desérticos, localizados en franjas longitudinales (Anexo 1).

A lo largo de la costa se localiza el clima desértico costero nuboso. Sus efectos se manifiestan hasta 20 kilómetros al interior donde la sequedad atmosférica es mayor, debido a que por causas del relieve la influencia marítima es retenida en los cerros de la Cordillera de la Costa. Las características principales de este subtipo climático se traducen en un efecto modelador de las temperaturas producido por la corriente fría de Humboldt, la presencia de abundante humedad, neblinas matinales y la ausencia de precipitaciones. Las lluvias registran un leve aumento hacia el sur del litoral, de igual manera lo mismo ocurre hacia el interior del altiplano.

En la franja intermedia de la región se desarrolla el subtipo climático desértico interior, y corresponde al clima desértico propiamente tal, caracterizado por una aridez extrema, ausencia de humedad, gran sequedad atmosférica y una amplitud térmica entre el día y la noche. Las temperaturas diurnas extremas son de 30° C y en la noche bajan de 1 a 2° C. En las zonas intermedias de las pampas interiores, encerradas por serranías del oriente por la Precordillera andina, la región posee las características climáticas más áridas del norte chileno. Es a esto lo que

se le denomina Desierto de Atacama, las precipitaciones son muy escasas y la humedad relativa es inferior al 50% (Golder, 2019).

Entre los 2.000 y 3.500 m s.n.m se localiza el clima desértico marginal de altura, el cual presenta mayor cantidad de volumen de precipitaciones en los meses de verano, entre 20 y 60 mm anuales. Esto permite el asentamiento de poblados cordilleranos como San Pedro de Atacama, Toconao o Chiu-chiu.

El clima de estepa de altura se localiza preferentemente en las áreas de los bordes o márgenes de los desiertos y también como sucede en el norte del país, existe un clima estepárico de altura. En esta región se ubica por sobre los 3.500 metros sobre el nivel del mar, lo que corresponde a la zona altiplánica o puna. Sus principales características son las bajas temperaturas (siendo la media anual de 2° C), la amplitud térmica entre el día y la noche es muy alta (más de 20° C). Las precipitaciones se producen en los meses de verano y no sobrepasan los 100 mm anuales. A medida que se avanza hacia el sur del altiplano de esta región, las lluvias de verano comienzan a disminuir y a mayor altura predomina una precipitación sólida.

4.2.1 Climatología Local

Las variables meteorológicas analizadas en el área de estudio corresponden a las precipitaciones, temperatura y radiación solar. La estación meteorológica de Laguna Seca entrega los siguientes registros:

4.2.1.1 Precipitación y Temperatura

Los datos de precipitación y temperatura de una determinada zona, son variables relevantes al momento de definir el balance de aguas de una cuenca, siendo parte fundamental de la recarga y descarga de una cuenca.

La cuenca Laguna Seca se encuentra influenciada principalmente por un clima desértico frío, lo que es posible complementar con los datos entregados por la estación meteorológica LS, donde se registra una temperatura anual promedio inferior a los 10°C y escasas precipitaciones anuales. En el Anexo 1, se presenta una tabla con información extendida de precipitaciones y temperaturas;

mínimas, máximas y medias, con sus respectivos gráficos. Mientras que la tabla (Tabla 1) que se muestra a continuación, expone un registro resumido mensual de estas variables.

Tabla 1: Temperaturas y precipitaciones registradas por la estación meteorológica Laguna Seca.

Mes	Temperatura (°C)	Precipitaciones (mm)
Enero	12.3	0.4
Febrero	12.2	0.1
Marzo	11.5	6.9
Abril	10.2	2.9
Mayo	8.1	2.1
Junio	6.5	1.1
Julio	6.1	2.9
Agosto	7.2	1.4
Septiembre	8.4	1.5
Octubre	9.8	0
Noviembre	11.1	0
Diciembre	11.9	0
Suma Anual	No aplica	19.3
Promedio Anual	9.6	1.6

El Gráfico 1 relaciona las temperaturas medias/mes y las precipitaciones mensuales, dando cuenta de que los meses más fríos no corresponden precisamente a los meses más lluviosos. Este fenómeno estaría influenciado por el denominado invierno altiplánico.

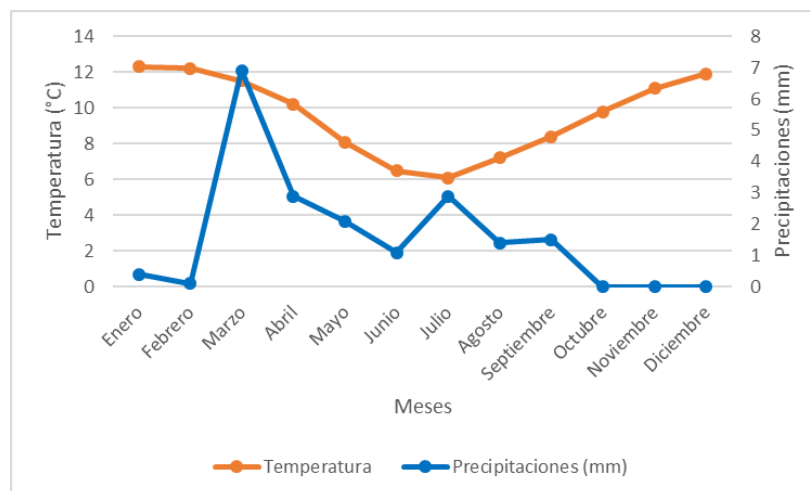


Gráfico 1: Temperatura vs Precipitaciones.

Las precipitaciones observadas durante el verano austral, se originan como lluvias orográficas causadas por masas de aire provenientes de la región del Amazonas durante la estación lluviosa.

Estas se producen especialmente en el Altiplano de la Cordillera de los Andes debido a la actividad convectiva, que es la precipitación que se asocia a la formación de nubosidad cumuliforme durante la tarde, cuando el calentamiento del suelo favorece el desarrollo de movimientos ascendentes y produce precipitaciones en este lugar.

4.2.1.2 Radiación solar

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la potencia que por unidad de superficie alcanza a la Tierra y su unidad es el W/m^2 . Similar a los datos de precipitación y temperatura, la radiación podría jugar un papel importante como variable hidrometeorológica, ya que presenta una notoria variación en sus valores de acuerdo a la estacionalidad.

Para evaluar la radiación solar en el área de estudio, MEL ha utilizado el registro de sus diez estaciones meteorológicas disponibles (Golder, 2019), además de los registros medios mensuales de la estación Calama El Loa (Dirección Meteorológica de Chile), Armazones (Ministerio de Energía) y Crucero 2 (Ministerio de Energía). Golder (2019) realiza una comparación de datos de las estaciones meteorológicas, estableciendo una relación directa entre la altura a la que se ubica la estación y la radiación media anual (W/m^2), observando una leve tendencia al aumento de la radiación con la elevación, lo que puede deberse a una mayor nubosidad en promedio a elevaciones menores. En menor medida, se espera una mayor radiación a mayores elevaciones, ya que existe un menor espesor de la atmósfera, y por lo tanto una menor dispersión de la radiación.

Para efectos de este trabajo se mostrará como ejemplo el registro de las estaciones Laguna Seca (MEL) y Cerro Marcelo (MEL). Cabe destacar que la radiación solar media mensual medida en la estación Laguna Seca fue ajustada ya que su registro presentaba valores muy altos en comparación con los medidos en las estaciones cercanas. Las estaciones Laguna Seca y Cerro Marcelo se encuentran muy cercanas y a una elevación similar, por lo que las condiciones climáticas y los registros meteorológicos registrados deberían ser similares.

El registro de radiación solar a nivel de las estaciones Laguna Seca y Cerro Marcelo comprende mediciones entre los años 2002 y 2003, respectivamente, hasta el año 2015. Estos datos se analizan

en detalle para obtener como información los valores medios y máximos de radiación solar, valores que son representados en las tablas 2 y 3.

Tabla 2: Radiación solar media y media máxima mensual (Estación Laguna Seca)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Media	379	353	326	280	230	212	224	268	319	361	391	397	312
Media Máxima	1192	1110	1053	919	773	721	769	881	1003	1086	1138	1147	983

Tabla 3: Radiación solar media y media máxima mensual (Estación Cerro Marcelo)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Media	391	357	306	265	237	216	268	286	313	369	390	398	316
Media Máxima	1218	1151	1071	966	834	749	886	935	1084	1155	1193	1228	1038

A partir de las Tablas 2 y 3, y de su representación gráfica (Gráficos 2 y 3) es posible observar una marcada estacionalidad de la radiación solar en el área de estudio, siendo mayor en los meses de primavera-verano (septiembre-marzo) y menor en los meses de otoño-invierno (abril-agosto). La variabilidad mensual está dada por la cantidad de horas de sol, y la intensidad de la radiación producto de la inclinación del sol respecto de la tierra, a la latitud del área de la cuenca. A nivel diario, los máximos de radiación se producen en el entorno del momento de la culminación solar, mientras que, en la noche, los valores de radiación solar son nulos.

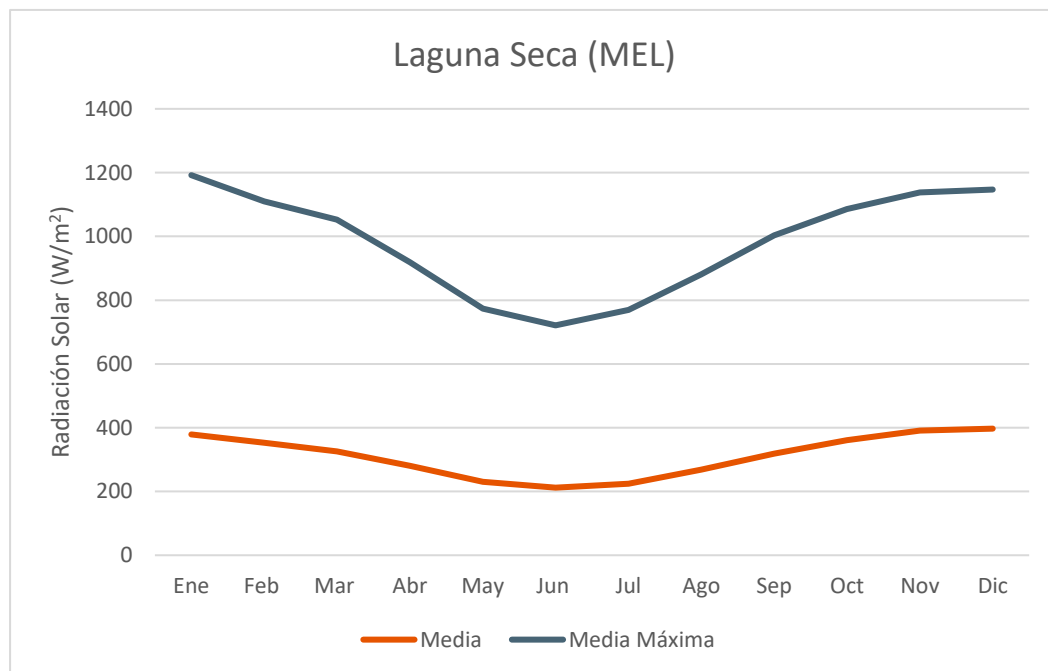


Gráfico 2: Radiación solar Estación Laguna Seca.

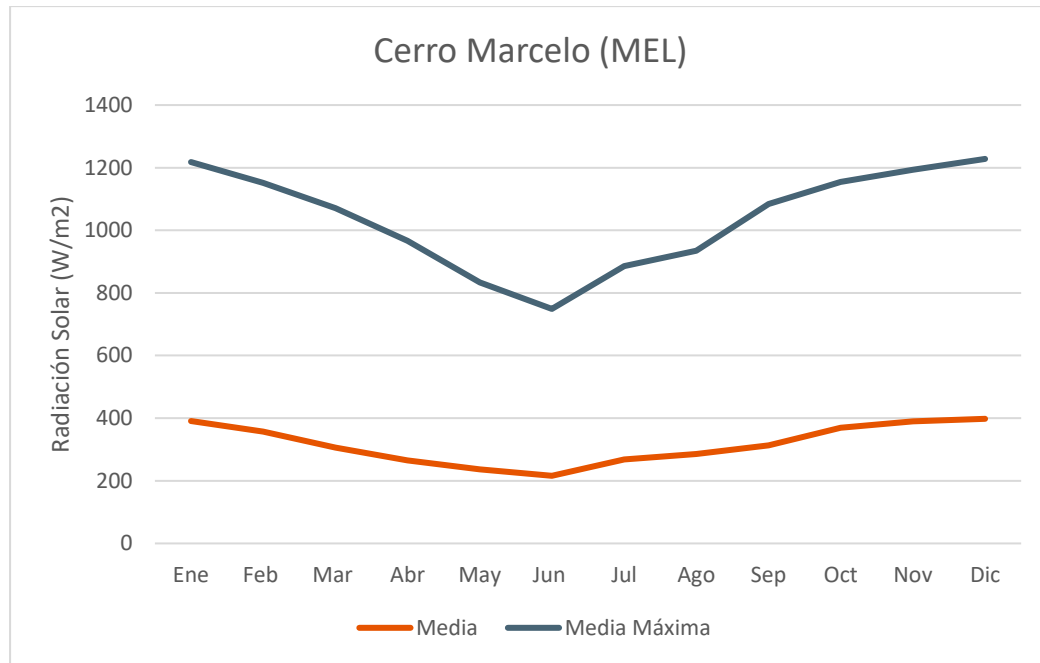


Gráfico 3: Radiación solar Estación Cerro Marcelo.

Los máximos medios mensuales se calculan buscando para cada mes el mayor de todos los máximos diarios de ese período, para luego promediar esos máximos mensuales sobre los años de registro (es decir, se promedian todos los máximos de enero, todos los de febrero, y así sucesivamente para cada mes del año). Esto implica que, para registros cortos (y/o intermitentes), máximos particularmente altos que ocurren en un mes de un año específico, alteran el máximo promedio, desviándolo del que se esperaría en el largo plazo para un cierto clima. Algo similar ocurre en el caso de los valores de radiación media mensual, aunque en menor medida.

4.3 SUELOS

En un análisis hidrogeológico es importante caracterizar los tipos de suelos presentes en la zona estudiada. El suelo corresponde a la parte más superficial de la litósfera continental y está constituido de fragmentos como grava, arena, arcillas y limo, además de espacios ocupados por aire y/o agua. También se encuentran en él restos de diversos organismos que lo habitan, aportan la materia orgánica y que, junto con los minerales presentes, alimentan a las plantas, que a su vez influyen de manera considerable en la capacidad del suelo de retener agua.

La composición del suelo y su distribución está determinada por la geomorfología, la zona geográfica y la forma e intensidad con la que han interactuado factores como el clima, organismos,

relieve, roca madre y tiempo. Así, los suelos tendrán propiedades diferentes en función de su proceso de formación. Los suelos se pueden clasificar de acuerdo a su textura según su contenido de arena, limo y arcilla, de tal manera que reciben el nombre de suelos arenosos, limosos y arcillosos, dependiendo de la textura predominante.

En la Región de Antofagasta predominan los suelos desérticos, cuyas principales características son la ausencia de horizontes superficiales y de materia orgánica. El desierto posee suelos pedregosos y arenosos, con acumulación de sales minerales, considerados suelos poco evolucionados. (Sánchez & Morales, 2000)

Dadas las condiciones de sequedad y temperaturas imperantes, los suelos predominantes en el desierto de la región de Antofagasta según el sistema de clasificación de suelos de USA, corresponderían en general a "Aridisoles", suelos de clima seco con o sin horizontes argílicos, y con acumulación de carbonatos, nitratos o sales solubles (Strahler, 1990 en CIREN, 2016).

4.4 BALANCE HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico consiste en la transferencia o movimiento del agua en fase líquida, sólida y gaseosa entre la atmósfera, los cuerpos de agua y el suelo. El concepto de balance hidrológico se basa en el carácter cíclico del término anteriormente descrito y en el principio de balance de masas. En pocas palabras, corresponde al equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado.

La ubicación de la cuenca Laguna Seca, al interior de la Cordillera de Domeyko, se caracteriza por:

- Escasas precipitaciones, con una media anual del orden de 20 mm/año (Tabla 1).
- Alta evaporación, con una media anual del orden de 3000 mm/año (DGA, 1987).

Esta combinación de valores de precipitación y evaporación genera como resultado valores de recarga por precipitación muy bajos. A su vez, las zonas más altas de la cuenca no se producen acumulaciones de nieve de forma permanente y que pudieran alimentar las aguas subterráneas por medio de deshielos.

El balance hidrológico se fundamenta en la ecuación (1) donde se considera que el total de agua proveniente de las precipitaciones del suelo recorrer distintos caminos:

a: Regresa a la atmósfera por evaporación y/o transpiración.

b: Escurre en la superficie hacia cuerpos de agua superficiales como ríos, lagos y embalses (escorrentía superficial).

c: Se infiltra en el terreno en dirección a acuíferos o embalses subterráneos (escorrentía subterránea).

$$P = ETR + EX + R \quad (1)$$

Dónde: P: precipitación anual (mm), ETR: evapotranspiración real anual (mm), EX: Excedentes de agua (Escorrentía superficial + Escorrentía subterránea o Infiltración) en mm, R: Recarga (mm).

En el área de estudio, debido al escaso o nulo desarrollo de suelo y falta de vegetación no se considerará la evapotranspiración. Sin embargo, para estimar un valor para la recarga por precipitación, se utilizó la expresión (2) propuesta por DICTUC (2009, en Golder, 2018) para cuencas altiplánicas:

$$R = C_I \times C_E \times P_p \quad (2)$$

Donde:

- R es la recarga (mm/año),
- C_I el coeficiente de infiltración,
- C_E el coeficiente de escorrentía, y
- P_p la precipitación (mm/año).

De acuerdo a DICTUC (2009, en Golder, 2018), los valores de C_I fluctúan entre 0,05 a 0,3, siendo más alto el valor mientras más alta sea la permeabilidad del medio. Al C_E , DICTUC (2009, en Golder, 2018) le asignó un valor de 0,13 para cuencas altiplánicas del norte de Chile.

Utilizando estos valores se obtiene un rango para recarga natural, con un máximo de 0,75 mm/año y un mínimo de aproximadamente 0,125 mm/año. Se adoptarán estos valores como límites de la recarga natural, entendiendo que es posible, dada las características de la cuenca y la extrema aridez de la zona, que la recarga natural pudiera ser incluso menor.

En el caso de la cuenca LS, el balance de aguas no solo está determinado por variables naturales, por lo que se vuelve imprescindible conceptualizar los procesos que están relacionados al TLS. La Figura 11 muestra un diagrama de la conceptualización de la operación del TLS adoptado para el balance operacional de aguas (Golder, 2018 y Celis, 2012), el cual ha permitido integrar de manera

simplificada la complejidad de los procesos físicos que se producen al interior de la cubeta de relaves.

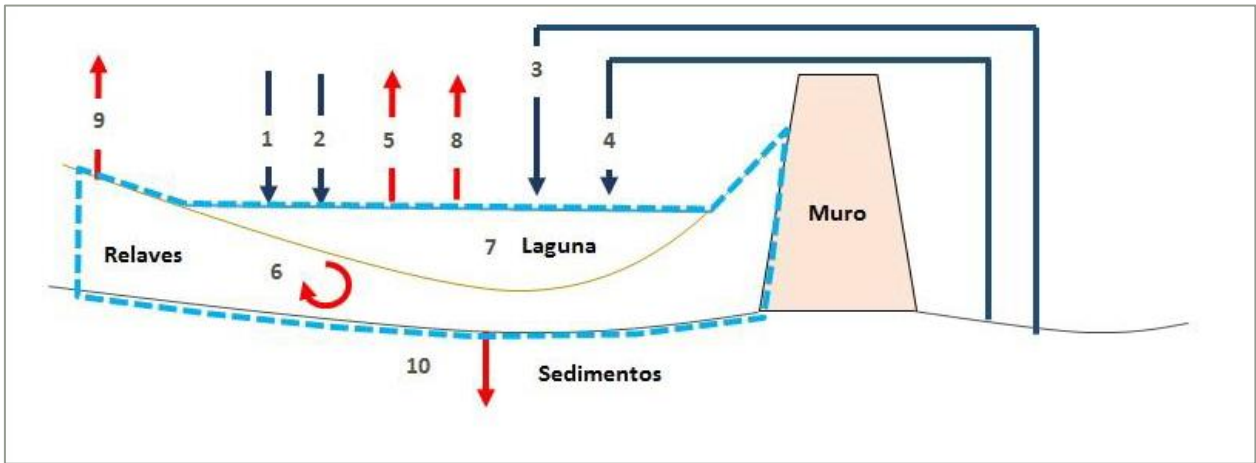


Figura 11: Modelo conceptual de balance de aguas para TLS (Golder, 2018).

El Tranque de relaves Laguna Seca posee una capacidad de almacenamiento de 4.500 Mt, donde se espera tener una superficie final de 6.200 há. Actualmente cuenta con distintas autorizaciones para su operación, entre ellos, permisos otorgados por el Ministerio de Agricultura, SERNAGEOMIN, SEREMI Salud, DGA, entre otros.

La operación TLS comenzó en abril del año 2002. Desde entonces, a la fecha, los relaves se han ido depositando al centro de la cuenca a través de un sistema de tuberías que abarca un área de aproximadamente 50 km². Estas tuberías conducen el relave hasta los puntos de descarga (spigots), los que se ubican en forma perimetral al área cubierta por los relaves. El tranque cuenta con un sistema de manejo de aguas clara que incluye la recuperación de aguas a través de una cortina de pozos y sistema de drenaje y la recirculación de aguas hacia las plantas concentradoras mediante bombas horizontales montadas sobre balsas independientes (móviles) que impulsan el agua recuperada hacia una serie de estaciones de bombeo (tipo Booster).

Celis (2012) señala que existe una serie de controles en el tranque de relaves para cumplir con la normativa ambiental (principalmente el Decreto N°86/60 regulado por el SERNAGEOMIN), los cuales buscan el control de la infiltración de aguas hacia el acuífero, el control de la laguna respecto al muro y ver la calidad de las aguas. Para esto, se cuenta con distintas herramientas que permiten monitorear los parámetros físicos y químicos de TLS, en el muro se utilizan piezómetros, clinómetros, clinoextensómetros, acelerómetros e interferometría satelital; y se realiza el monitoreo

físico-químico de aguas superficiales y subterráneas reportado en informes de forma regular (trimestral).

La “cortina de pozos”, se encuentra aguas abajo del muro del depósito de relaves con el fin de interceptar el flujo de infiltraciones generado por la cubeta de relaves, se compone de un total de 9 pozos de bombeo de 42 a 78 metros de profundidad y 17,5 pulgadas de diámetro alineados en 2 filas paralelas al eje del muro distanciadas aproximadamente 330 metros entre sí y 7 de ellos se encuentran activos. Los caudales individuales de bombeo son de 1,5 a 16 l/s dependiendo de la transmisibilidad del entorno de cada pozo. La capacidad total de bombeo del sistema es 67 l/s aproximadamente (Celis, 2012 y reportes trimestrales de MEL).

Golder (2018) define como volumen de control la cubeta de relaves, sobre el cual se generan las entradas y salidas de agua del sistema (Figura 11). Para simplificar el análisis, se ha supuesto que el sistema se encuentra en un equilibrio, es decir, que las entradas de agua al volumen de control son iguales a las salidas. Bajo este supuesto, el agua retenida en los relaves, que en rigor representa una variación de almacenamiento, será considerada una pérdida.

De esta forma, las entradas y salidas del sistema quedan definidas de la siguiente forma:

- Entradas de agua: (1) agua en relaves, (2) precipitaciones, (3) recirculación desde cortina hidráulica, (4) recirculación desde drenes basales del muro.
- Salidas de agua: (5) agua recuperada (bombeo desde laguna), (6) retención en relaves, (7) inventario de laguna, (8) evaporación desde laguna, (9) evaporación desde playas de relaves, (10) infiltración desde la laguna.

A continuación, se describe conceptualmente cada una de las entradas al sistema:

1. Agua en relaves: corresponde a la fracción líquida de los relaves descargados en el TLS.
2. Precipitaciones: esta componente del ciclo hidrológico es el único medio de recarga natural en el TLS, aunque como se describió anteriormente su aporte es bastante reducido, registrándose sólo 19,3 mm/año.
3. Cortina hidráulica: corresponde al conjunto de pozos de bombeo ubicados inmediatamente aguas abajo del muro del TLS cuyo objetivo es controlar las infiltraciones del TLS en el

acuífero de la cuenca Laguna Seca. La totalidad de las aguas bombeadas por el sistema de cortina hidráulica son enviadas hacia la laguna de aguas recuperadas.

4. Drenes: el sistema drenes se ubica en la base del muro. Las aguas colectadas por el sistema de drenes son acumuladas en una piscina ubicada 100 m al oeste de la base del muro desde donde son enviadas hacia la laguna de aguas recuperadas.

Los componentes de salida del sistema son:

5. Agua recuperada: esta componente corresponde a agua bombeada desde la laguna que es re circulada para su utilización en el proceso.
6. Retención en relaves: este componente representa al agua que queda retenida en los poros de los relaves.
7. Inventario de la laguna: corresponde a la variación temporal del volumen total de la laguna, la cual actúa como sumidero o reservorio dependiendo de la operación.
8. Evaporación de la laguna: es la fracción de agua que se evapora directamente desde la superficie de la laguna.
9. Evaporación desde playas: esta pérdida contabiliza la evaporación producida en la playa activa o anteriormente depositada, es decir, en la superficie donde se está descargando relave o aquellas áreas que aún tienen disponibilidad de agua para evaporar.
10. Infiltración desde el TLS: corresponde al volumen de agua que es transferido desde la base del depósito de relaves hacia el acuífero regional subyacente.

5. ENSAYOS Y TECNICAS ANALÍTICAS

Antes de realizar ensayos hidráulicos, tomar muestras o medir niveles de agua, es necesario confeccionar un catastro de pozos de la zona de estudio y corroborar el estado y correcta habilitación de cada pozo. Si es posible tener acceso a data histórica, se recomienda analizar el historial de extracciones, mediciones y análisis químico de muestras de agua.

5.1 REVISIÓN DE SONDAJES

La mejor manera de comprender el carácter geológico del subsuelo es obtener muestras mediante perforaciones, las cuales son una poderosa herramienta para identificar estructuras que no es posible visualizar en superficie. Las muestras extraídas de profundidad pueden ser testigos o “cuttings”, dependiendo del tipo de perforación que se realice en función de los estudios que se desee realizar. Además, la recolección de muestras representativas es crítica, ya que las muestras geológicas se usan comúnmente en modelamiento geológico, cálculo de reservas y clasificación de recursos geológicos, exploración de aguas subterráneas para identificar acuíferos, determinar el tamaño de las aberturas de pantallas de pozos y estimar la capacidad de producción/extracción potencial de los pozos (Sterrett, 2007). Para un estudio detallado de los sondeos e identificar estructuras, es necesario realizar perforaciones de tipo diamantina o DDH, donde una broca diamantada permite la extracción de un testigo sólido de roca (Figura 12).

En el área de estudio, se cuenta con el registro de decenas de sondeos dentro y fuera de la cuenca. A continuación, se presenta un ejemplo de descripción y análisis de sondeo, realizado por Arcadis (2019), utilizados para identificar zonas de debilidad estructural.

El Sondeo SP-12 está ubicado aguas abajo del muro del tranque LS, al lado norte del eje central del muro. Corresponde principalmente a areniscas con alternancia de lutitas, de color amarillo a rojizo, de manera general se encuentra moderadamente fracturada y llegando a los 50 metros de profundidad se registró una brecha de falla de unos 70 cm de espesor aproximadamente. La Tabla 4 muestra, a modo de ejemplo, cómo realizar la descripción por tramo de un testigo.



Figura 12. Fotografías del Sondaje SP-12.

Tabla 4. Descripción del sondaje SP-12 (Arcadis, 2019)

Intervalo		Descripción litológica
Desde (m)	Hasta (m)	
1.15	1.50	Arenisca grano fino, color amarillo, moderadamente fracturada, clastos redondeados de lutitas, vetilleo moderado a intenso de calcita y yeso.
1.50	2.50	
2.50	5.15	
5.15	8.25	
8.25	11.15	
11.15	14.25	
14.25	16.55	
16.55	17.45	
17.45	20.60	
20.60	22.75	
22.75	23.55	Arenisca grano fino, color amarillo, moderadamente fracturada, clastos redondeados de lutitas alta.
23.55	25.00	
25.00	25.80	
25.80	26.40	Arenisca grano fino, color marrón amarillo a gris, moderadamente fracturada.
26.40	27.20	
27.20	28.50	
28.50	30.50	Alternancia de lutitas y areniscas de grano fino.
30.50	33.40	
33.40	36.50	
36.50	39.65	Arenisca de grano fino, color rojizo y bajo fracturamiento.
39.65	40.80	
40.80	43.20	
43.20	45.10	Brecha de falla hasta los 45.82 m
45.10	46.80	
46.80	49.90	
49.90	50.00	Areniscas finas rojizas. Últimos 17 cm lutitas negras.

El sondaje SP-12 presenta estructuras con rumbos preferenciales NNW y NNE con manteos principales hacia el WSW. En la Figura 13 se muestran las orientaciones de rumbo (A) y manteo (B) de las estructuras. El sondaje presenta una frecuencia de fracturas media (5,48 fract/m en promedio). La mayoría de estas estructuras se ubican entre los 45 m y 46 m de profundidad con rumbos NNW y manteos mayoritarios entre los 30° y 45° (Arcadis, 2019).

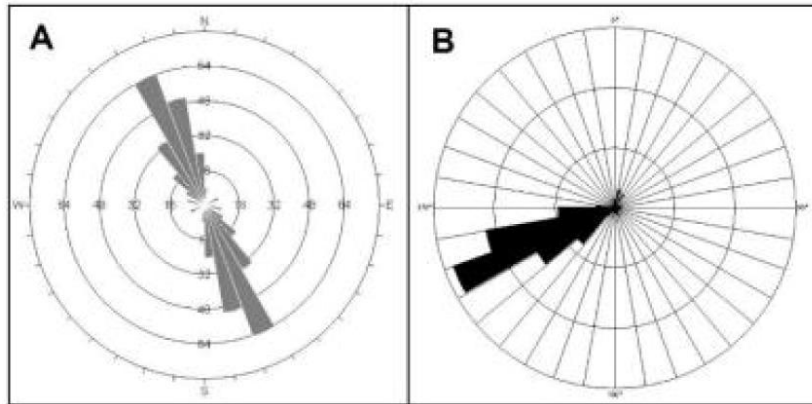


Figura 13. A: Orientación rumbos, B: Orientación manteos (Arcadis, 2019).

La identificación de sectores con estructuras menores o diferencias litológicas permite identificar zonas favorables de almacenamiento y transmisividad de los flujos de agua. De igual modo, conocer la orientación de fallas o estructuras menores, permite tener una idea de la dirección que podrían tener los flujos de agua subterráneos dentro de una cuenca, donde estos ocuparían las zonas de debilidad de la roca para fluir. En el caso del sondaje SP-12, donde se conoce la orientación de las estructuras, la frecuencia de fracturas y el espesor de la brecha de falla, es de esperar que sea una zona favorable para la conducción de agua, lo cual podría comprobarse utilizando técnicas de trazadores para evaluar el comportamiento del flujo de agua a través de la zona de falla.

5.1.1 R.Q.D.

Rock Quality Designation (RQD) es un índice cuantitativo (3) basado en la recuperación de fragmentos intactos de un testigo y se define como el porcentaje de trozos de un testigo mayores a 10 cm en la longitud total del tramo de sondaje, donde el resultado indica de manera cualitativa la calidad de la roca (Figura 14)

$$R. Q. D. (\%) = \frac{\sum \text{Trozos de testigo} > 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total del tramo del sondaje}} \times 100 \quad (3)$$

El grado de fracturamiento de los materiales, obtenido mediante R.Q.D., frecuencia de fracturas (FF) o descripciones cualitativas, es una variable a considerar como input a la hora de definir las Unidades Hidrogeológicas, las cuales, en función de sus propiedades desde el punto de vista hidráulico, van a definir el comportamiento de los flujos de agua. Por lo tanto, a partir de la descripción estructural detallada de los sondajes; es posible identificar la calidad de la roca en profundidad y estimar zonas de debilidad estructural favorables para la circulación de flujos de agua.

Anteriormente, se dio a conocer la cantidad de información que es posible obtener de un sondaje. El R.Q.D. permite clasificar estos sondajes mediante la calidad que presenta la roca en profundidad, por lo tanto, tener una mayor cantidad de sondajes, abarcando una mayor área de estudio, permite conocer, mediante secciones, la extensión de zonas de buena o mala calidad de roca que sean o no favorables para el flujo de agua.

La Figura 14, corresponde a una sección esquemática dentro de la cuenca que abarca 21 sondajes con sus respectivos R.Q.D., donde los sondajes 1, 4 y 16 presentan una calidad de roca buena a muy buena, mientras que los sondajes 2, 3, 7, 8, 17, 20 y 21 presentan una calidad mala a muy mala, siendo estos últimos los que representan una zona favorable para los flujos de agua subterráneos. Este perfil esquemático fue modificado desde un informe técnico emitido por Arcadis (2019), eliminando los códigos reales de los pozos y dejando en su lugar, números correlativos para poder identificarlos.

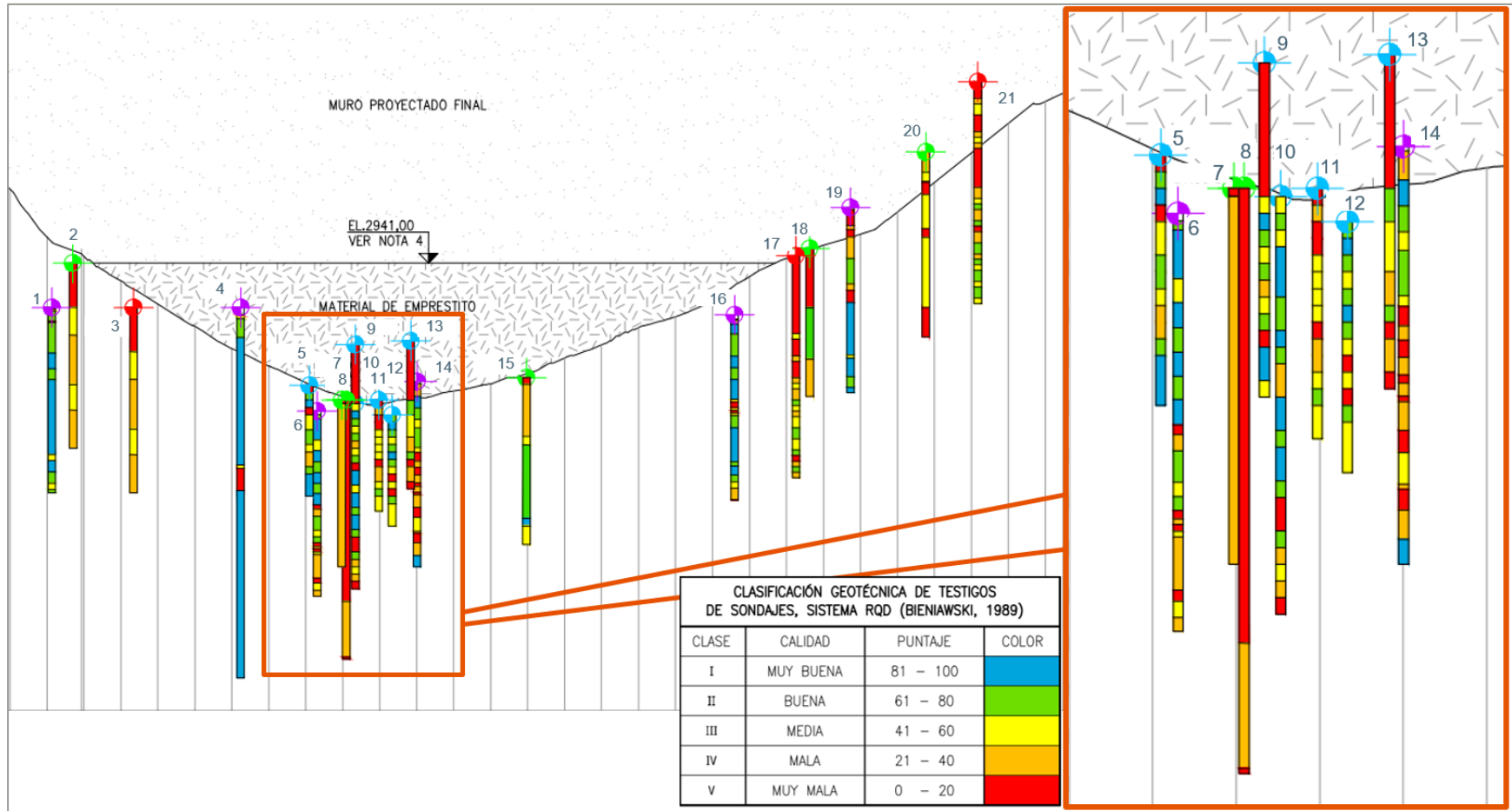


Figura 14. Perfil esquemático de sondajes realizados en la cuenca Laguna Seca, se indica de manera visual RQD de los testigos extraídos. (Modificado de Arcadis, 2019)

5.2 NIVELES Y CAUDALES

El nivel freático corresponde al nivel superior de una capa freática o de un acuífero en general. Al perforar un pozo de captación de agua subterránea en un acuífero libre, el nivel freático es la distancia a la que se encuentra el agua desde la superficie del terreno, y en este caso la presión de agua en la superficie del acuífero es igual a la presión atmosférica. Por lo tanto, en un acuífero libre el nivel freático es igual al nivel piezométrico. En el caso de un acuífero confinado, el agua se encuentra bajo una presión que es mayor que la presión atmosférica. Por lo tanto, el nivel freático es distinto al nivel piezométrico.

Al llevar un registro constante y frecuente de las mediciones de niveles de agua, es posible realizar un análisis para cada acuífero, desde la perspectiva temporal, para entender el comportamiento piezométrico y establecer tendencias, y desde la perspectiva espacial, para establecer la distribución, gradientes y sentido de escurrimiento. Es importante mencionar que se pueden tener distintos sectores de acuíferos, o bien acuíferos distintos, uno sobre otro (SEA, 2012).

Las observaciones para el modelo de flujos corresponden a los niveles piezométricos, asociados a cada pozo de observación y a la piezometría, dada por la superficie generada por el conjunto de niveles piezométricos. Esta última debe ser considerada para ajustar, además de los niveles individuales observados, el comportamiento general de los flujos. La ubicación de los pozos de observación es fundamental a la hora de contar con observaciones representativas y de calidad.

En Escondida-BHP se realiza monitoreo semanal de los pozos de observación (aguas arriba y aguas abajo del muro de TLS) y de la cortina de pozos (pozos de bombeo). En los primeros, se registran los niveles de agua, medición in situ de química y toma de muestras para su posterior análisis en laboratorio. En los segundos, se mide el nivel estático y/o dinámico, el caudal de bombeo y se realizan análisis de calidad del agua. El nivel de agua en los pozos se mide con un pozómetro, el caudal se mide con flujómetro electromagnético ubicado en la boca del pozo y las muestras de agua se obtienen utilizando un bailer (pozos de observación) o se toman en el manifold de descarga del pozo (pozos de bombeo).

Para mantener un monitoreo adecuado de los pozos, es necesario dar seguimiento a las mediciones de niveles de agua, evaluar las variaciones que presentan en el tiempo y si estos niveles responden

a cambios frente a la inyección o extracción de agua. Ejemplo de esto es la Figura 15, donde se muestran los niveles de agua históricos en los pozos de observación aguas arriba del tranque hasta marzo de 2020; y en la Figura 16 se muestra el nivel freático de los pozos que están actualmente en funcionamiento (Reportes trimestrales de MEL). Esta última figura muestra que los niveles en los pozos ubicados aguas arriba del muro mantienen un comportamiento estable en los últimos años.

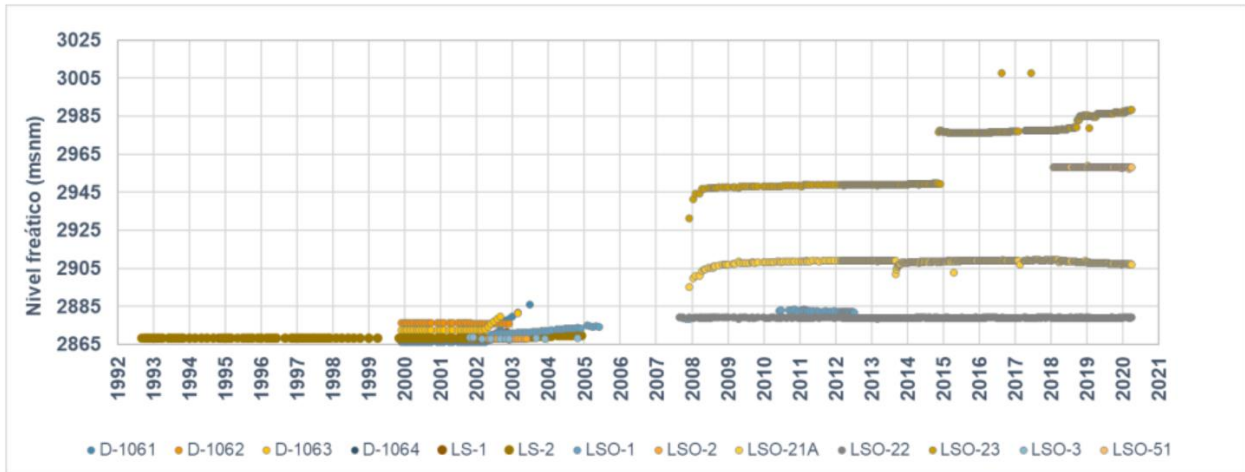


Figura 15: Nivel freático histórico en pozos ubicados aguas arriba del muro.

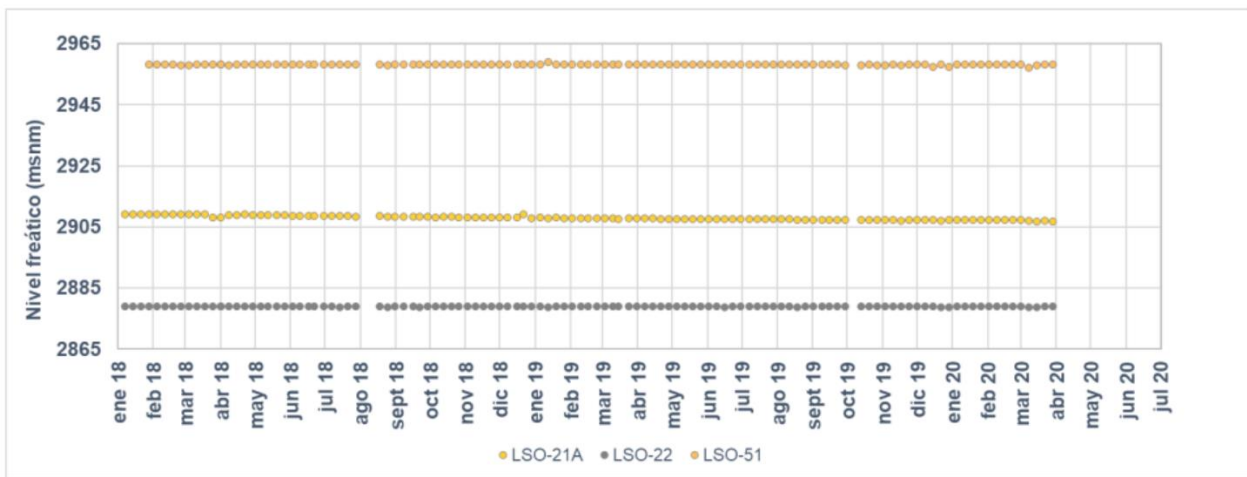


Figura 16: Nivel freático en pozos actuales ubicados aguas arriba del muro.

Los pozos de observación aguas abajo, comprometidos y voluntarios, se muestran en las Figuras 17 y 18, sus niveles muestran un comportamiento estable con valores levemente menores al periodo anterior. En el caso del pozo LSO-7A se observa que sus mediciones están bajo los valores históricos y mostrando un comportamiento errático, posiblemente atribuibles a obstrucción en las

cribas lo que no permite una correcta recuperación después de la toma de muestras de calidad, por esta razón no se considera dentro del análisis de nivel de los pozos aguas abajo.

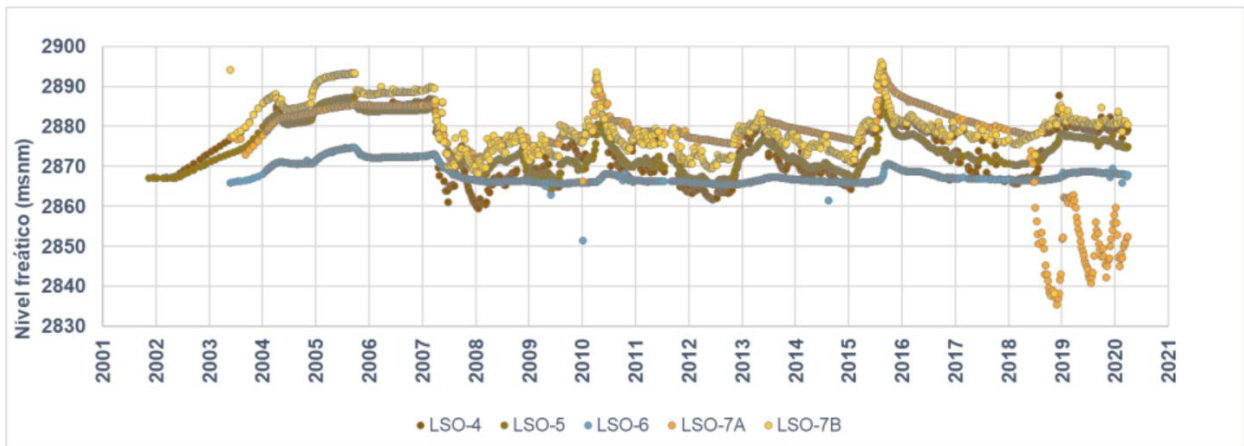


Figura 17: Nivel freático histórico en pozos de observación aguas abajo del muro

El 11 de enero de 2002 entra en operación TLS, aumentando los niveles freáticos aguas abajo del muro TLS. El pozo LSP-6 comienza a bombear en abril de 2004, por lo que las variaciones de extracción de agua en el pozo LSP-6 de la cortina de bombeo, tiene una relación directa con la disminución de los niveles freáticos entre los años 2004 y 2007. En abril de 2007 comienza el bombeo de pozos nuevos disminuyendo considerablemente los niveles freáticos en el sector aguas abajo del muro TLS ($\sim \Delta 10$ metros).

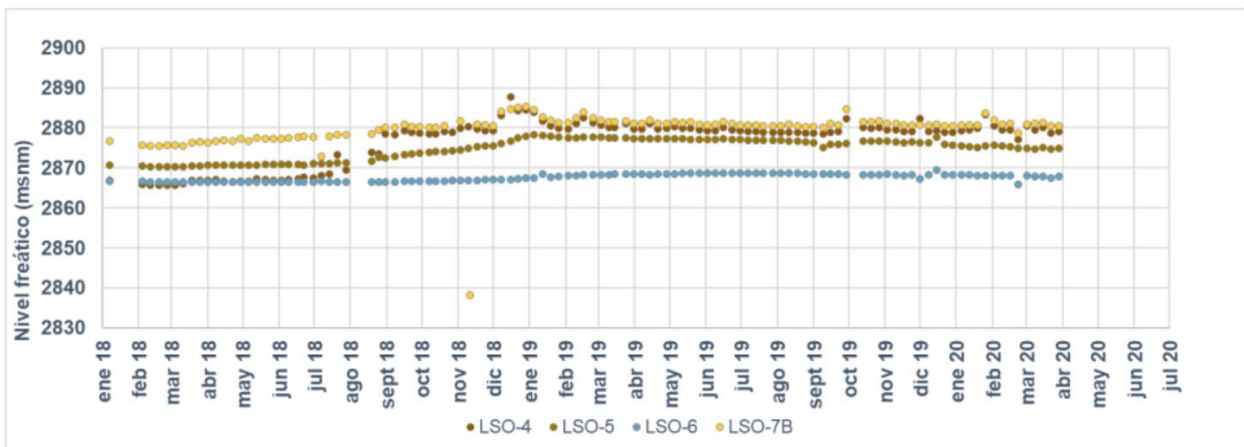


Figura 18: Nivel freático actual en pozos de observación aguas abajo del muro.

En la Figura 19 se presenta el monitoreo del caudal para los 7 pozos de bombeo operativos de la cortina. Como se observa, el caudal total promedio de la cortina ha variado entre 20 y 46 l/s aproximadamente en los últimos 2 años.

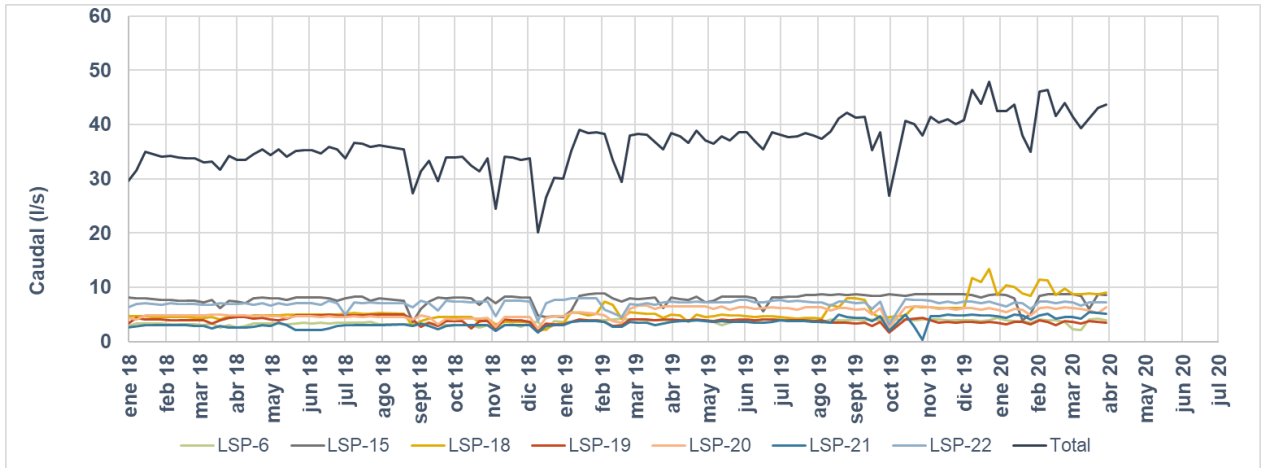


Figura 19: Caudal de bombeo pozos de la cortina en los últimos dos años.

En la Figura 20 y Figura 21 se presenta el monitoreo de nivel freático en los 7 pozos de bombeo que se encuentran operativos de la cortina. Las variaciones observadas en los niveles corresponden a las propias de la operación de pozos de bombeo.

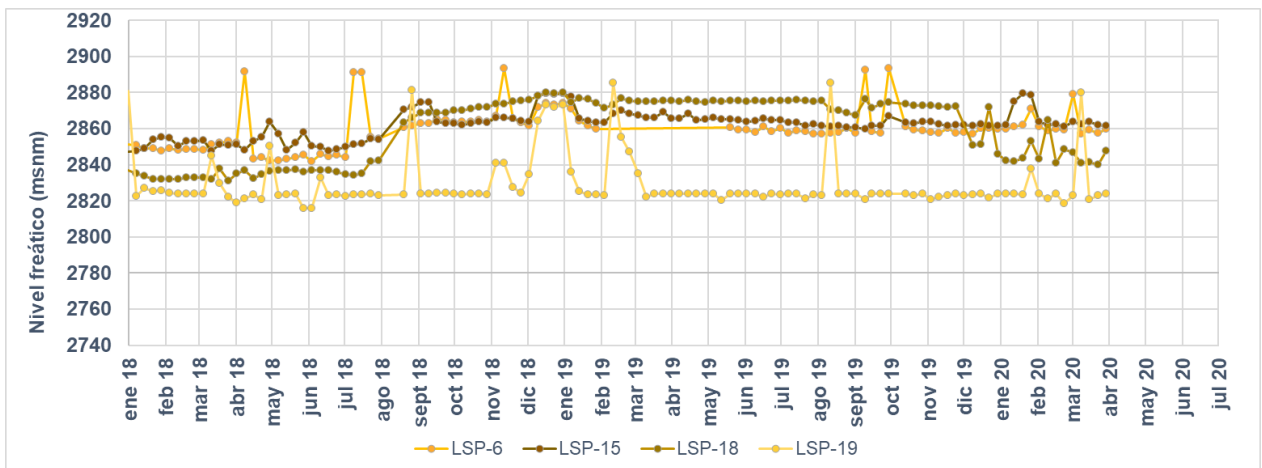


Figura 20: Nivel freático en pozos de la cortina en los últimos dos años (a).

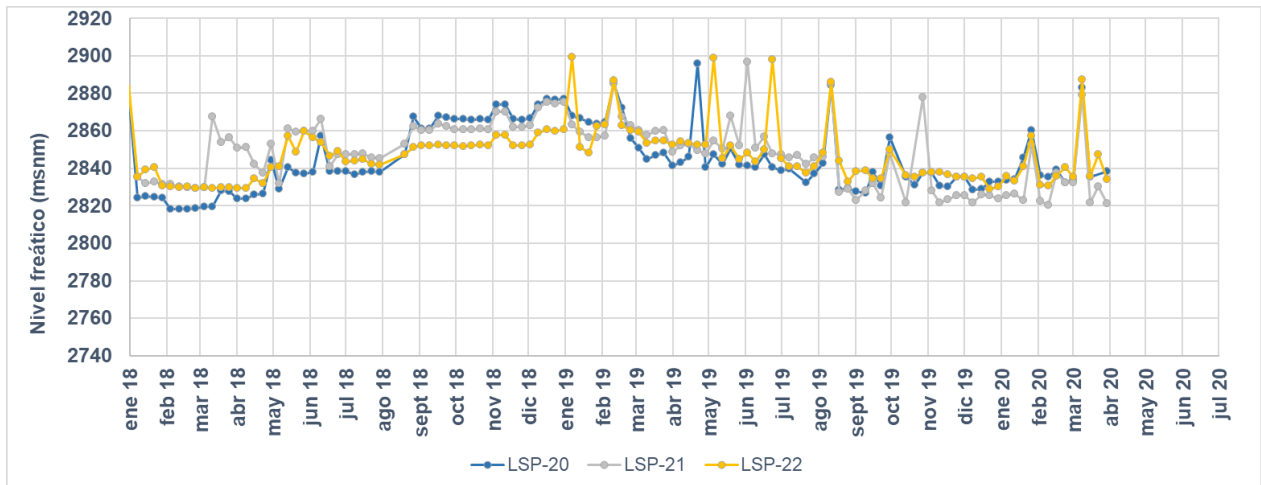


Figura 21: Nivel freático en pozos de la cortina (b).

Es importante señalar que este capítulo es primordial al momento de identificar flujos subterráneos de agua, ya que, con la base de datos creada de los niveles de agua de los pozos presentes en la cuenca, es posible crear un modelo de la superficie piezométrica, la cual se presentará más adelante. Además, es necesario mencionar que dicha base de datos no será mostrada en este trabajo por políticas de la empresa.

5.3 ENSAYOS HIDRÁULICOS

Un ensayo de bombeo es una prueba utilizada en hidrogeología para caracterizar un sistema de acuíferos y consiste en el bombeo de agua desde un pozo, normalmente a caudal constante y la medición de cambios en los niveles de agua (descensos) en el mismo pozo y en los puntos de observación (Vázquez-Suñe, 2009). Estos ensayos permiten calcular la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, pero en general son métodos costosos y a veces imposibles de realizar, ya que no siempre existen dos sondeos próximos en el mismo nivel acuífero. En estos casos, las medidas puntuales de la permeabilidad constituyen la alternativa más sencilla, aunque hay que considerar que estos métodos suelen realizarse en pocos metros de profundidad y, por lo tanto, no reemplazan los ensayos de bombeo. A continuación, se definen 3 ensayos puntuales que pueden realizarse durante las perforaciones de los sondajes:

- a) Método de Lefranc corresponde a uno de los ensayos de permeabilidad, in situ, que se aplica principalmente a suelos o sedimentos poco consolidados. Consiste en introducir, o bombear

agua desde un sondaje, donde la cavidad es mantenida constante, a una determinada profundidad ya sea a presión constante o variable.

- b) La prueba Lugeon, o ensayo Lugeon, es un ensayo que se realiza para estimar la permeabilidad del suelo y a diferencia del anterior, se aplica principalmente en rocas fracturadas. Consiste en medir el volumen del agua "V" que se consigue inyectar en el suelo durante un tiempo determinado "t", en otras palabras, se mide el caudal $Q=V/t$, en un tramo de una longitud determinada "L", a una presión constante.
- c) Método de Packer mide permeabilidad y porosidad. Un packer es un elemento inflable de goma, se usa para sellar el espacio anular entre la sarta de perforación y la pared del pozo. Existen diferentes tipos de packers. Se pueden muestrear fluidos en la formación si ésta es permeable. Es posible derivar la permeabilidad y porosidad en una sección aislada de un pozo abierto usando un packer encima de otro (es decir dos packers) usando pruebas de bombeo de presión a pulso, slug test, o tasas de inyección contrastadas.

Escondida-BHP realiza ensayos de bombeo (constante y variable) y ensayos Lefranc, Lugeon, Slug test e inyección durante las perforaciones. El conjunto de los ensayos disponibles permite caracterizar la conductividad hidráulica del acuífero en los primeros 100 m bajo la superficie. En la Tabla 5 se muestran los rangos de conductividad hidráulica medidos en los ensayos disponibles a la fecha. Según los datos analizados, los resultados de las pruebas de bombeo muestran, en términos generales, mayores conductividades que los ensayos en perforación, condición que es esperable por las diferencias que existen entre los tipos de ensayos.

Tabla 5: Parámetros hidráulicos para las unidades geológicas (Golder, 2018).

Unidad Geológica	Máximo	Mínimo	Medida Geométrica
Sedimentos	4.6×10^{-6}	6.0×10^{-8}	3.8×10^{-7}
Areniscas	2.3×10^{-5}	4.0×10^{-10}	2.2×10^{-7}
Intercalación Areniscas y Lutitas	2.0×10^{-6}	4.0×10^{-8}	1.6×10^{-7}
Lutitas	8.7×10^{-6}	7.0×10^{-10}	1.6×10^{-7}
Areniscas / Intercalación Areniscas y Lutitas	5.8×10^{-8}	3.2×10^{-8}	4.3×10^{-8}
Areniscas / Intercalación Areniscas y Lutitas / Lutitas	2.2×10^{-5}	3.5×10^{-6}	8.8×10^{-6}
Areniscas / Lutitas	7.6×10^{-5}	2.5×10^{-8}	3.7×10^{-6}
Intercalación Areniscas y Lutitas / Lutitas	5.3×10^{-5}	1.2×10^{-5}	2.0×10^{-5}

Según el informe entregado por Golder (2018), la zona más permeable del tranque de relave se ubica en el centro de la quebrada, resultado que estaría condicionado por la ubicación de las pruebas

de bombeo que se encuentran distribuidas exclusivamente en ese sector, mientras que en los sectores norte y sur del muro TLS solo se dispone de ensayos ejecutados durante las perforaciones de los sondajes.

5.4 HIDROGEOQUÍMICA

La geoquímica de aguas subterráneas consiste en la documentación y análisis de la composición química de las aguas y en la comprensión de los procesos que afectan su calidad (Chapelle, 2005 en SEA, 2012; Appelo & Postma, 2005). La hidrogeoquímica es fundamental para estudios hidrogeológicos y ambientales, tiene como finalidad determinar la calidad química del agua, establecer relaciones entre las fuentes, composición, distribución y circulación del agua en los acuíferos y la geología, mineralogía y sistema de flujo de éstos (Vázquez-Suñe, 2009).

La calidad del agua puede verse afectada por efectos antropogénicos, cuyo impacto puede ser detectado a corto o largo plazo, razón por la cual es relevante monitorear las aguas, superficiales y subterráneas, que pueden ser afectadas por desechos industriales o actividades minero-metalúrgicas.

Algunos de los análisis que se realizan a partir de la hidrogeoquímica y que ayudan a identificar flujos preferenciales de agua, son: definir patrones e índices hidroquímicos a partir de elementos mayoritarios, y el uso de isótopos estables.

Como parte de la conceptualización hidrogeológica del sistema de la cuenca Laguna Seca, el presente capítulo tiene como objetivo presentar la metodología utilizada para caracterizar química e isotópicamente el agua del acuífero, las aguas del TLS, y de los puntos de monitoreo alrededor del tranque. A modo de ejemplo, se utilizarán datos pre-operacionales al TLS y datos del primer trimestre del presente año.

En este capítulo se mostrarán datos hidrogeoquímicos e isotópicos, los cuales se complementan para lograr un mejor entendimiento de la evolución y estado actual de la calidad química de las aguas subterráneas en la cuenca Laguna Seca.

5.4.1 Calidad de Agua Pre-Operacional a TLS.

La hidroquímica del acuífero natural se define con la línea base pre-operacional de la cuenca. La calidad de aguas correspondiente al periodo 1997-2001, está caracterizada por la información proveniente de 16 pozos perforados en el sector centro-norte de la cuenca, y por ende dentro de la huella actual del tranque de relaves.

En la Tabla 6 se muestran los rangos de concentración observados en la condición previa a la operación del TLS para los elementos y parámetros analizados en los pozos con información disponible para este periodo.

Tabla 6: Parámetros químicos pre TLS.

Parámetro	Unidad	Promedio	Rango(*)
pH	-	7,53	7.26-8.02
SDT	mg/L	5.806	2846-9290
Cl	mg/L	824	150-1568
SO4	mg/L	2.636	1225-3976
HCO3	mg/L	152	40-346
NO3	mg/L	68	2-185
Na	mg/L	995	240-1744
K	mg/L	53	12-82
Ca	mg/L	455	303-586
Mg	mg/L	177	51-338
SiO2	mg/L	15	10-20

En la Figura 22 se presenta un diagrama de Piper de las aguas pre-operacionales donde se puede observar que el tipo de agua dominante en la cuenca varía desde sulfatadas-cálcicas a sulfatadas-sódicas, con solo dos aguas registradas, de composición clorurada-sódica. El sulfato se presenta como el anión dominante en las aguas naturales de la cuenca. Para los cationes, el sodio y el calcio presentan las concentraciones mayores en todas las aguas analizadas.

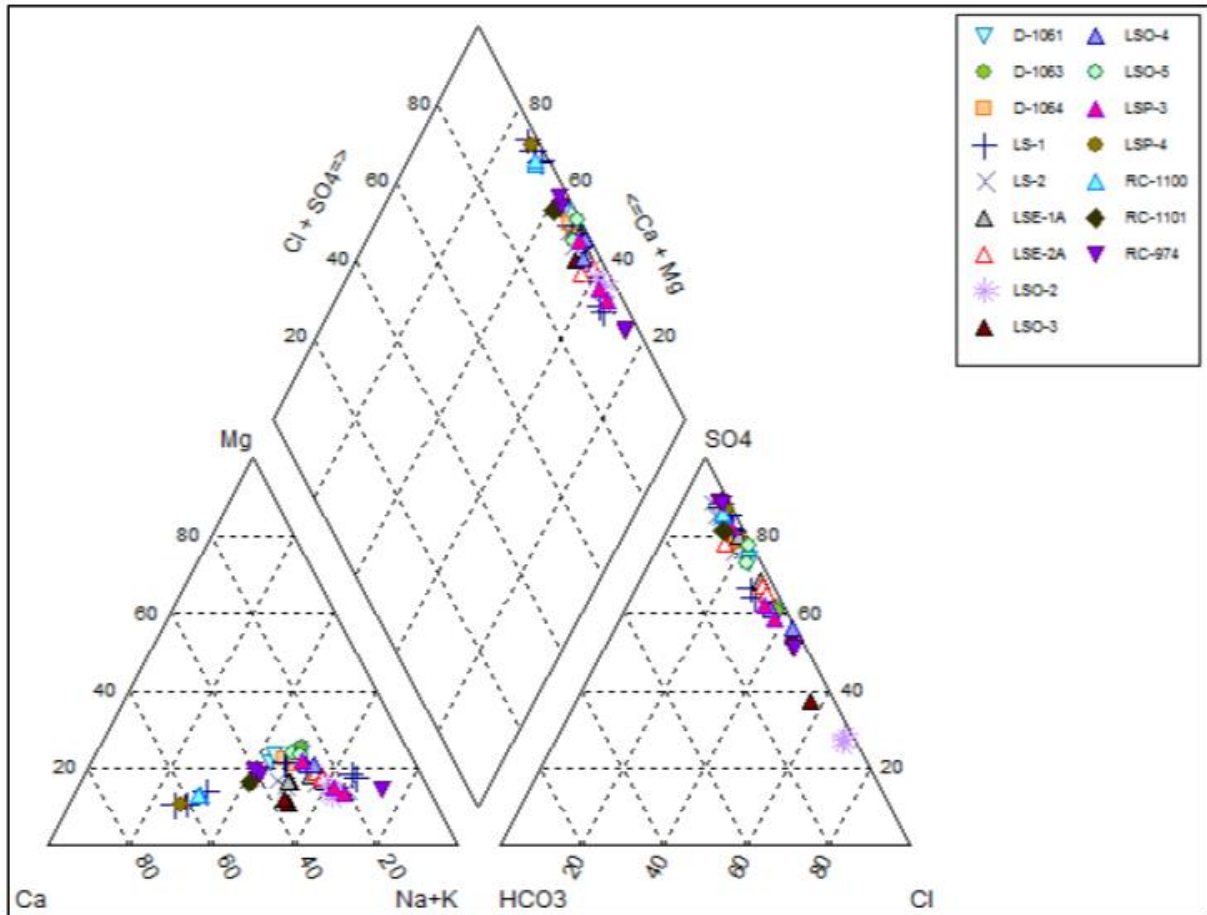


Figura 22: Diagrama de Piper para aguas pre TLS

5.4.2 Calidad De Agua Durante Operaciones TLS

Desde el comienzo de las operaciones del TLS, se ha mantenido un control en la calidad de las aguas del TLS y sus alrededores. En este subcapítulo se utilizará información comprendida entre enero y marzo del año 2020, considerando esta información como la más reciente disponible para este trabajo.

En la Tabla 7 se muestra un promedio para los valores registrados a principios del presente año, de aniones y cationes mayoritarios, con la finalidad de simplificar la extensa base de datos históricos presentes en los reportes trimestrales y obtener una huella química representativa para este periodo.

Tabla 7: Concentraciones de aniones y cationes mayoritarios

	Aniones Mayoritarios				Cationes Mayoritarios			
	Cl	HCO ₃	NO ₃	SO ₄	Ca	K	Mg	Na
Punto	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
LSP-6	2423.00	91.55	1188.08	2349.58	791.33	94.78	271.75	1807.17
LSP-13	2509.31	74.65	1478.86	1933.23	931.38	84.80	276.59	1518.00
LSP-15	2533.77	119.07	1116.81	2300.77	816.60	93.69	296.33	1835.77
LSP-16	2478.85	118.62	1010.73	2229.85	795.21	97.29	297.39	1765.00
LSP-18	2358.69	96.00	1334.89	1938.85	943.54	69.53	332.09	1418.69
LSP-19	2281.00	72.22	969.48	2586.08	712.51	103.75	236.47	1859.62
LSP-20	2363.08	70.33	928.79	2433.92	760.87	95.39	220.56	1786.15
LSP-21	2285.62	64.86	903.35	2539.69	733.80	100.86	223.78	1784.23
LSP-22	2482.08	72.16	1038.58	2327.54	749.39	96.02	226.20	1851.23
LSO-4	2487.08	66.99	1307.73	2481.31	751.41	101.94	243.55	1971.23
LSO-5	1723.23	116.97	759.39	2327.38	702.96	80.12	332.65	1205.54
LSO-6	1075.85	159.05	215.43	2652.54	583.05	57.61	260.68	1007.91
LSO-7A	2319.00	175.45	828.43	2495.25	659.90	82.16	255.58	1816.00
LSO-7B	2369.31	96.61	1080.84	2396.85	751.56	102.30	252.55	1920.77
LSO-21A	1524.62	129.52	5.39	2254.54	667.26	17.36	61.45	1238.54
LSO-22	1150.54	117.84	42.80	2328.85	509.16	19.62	211.25	903.39
LSO-51	502.77	36.64	5.70	2720.92	537.24	14.90	84.74	919.16
LSV-1	1098.69	155.61	268.02	2620.25	611.55	57.19	263.54	1009.99
Fase líq relave	1718.58	16.67	405.02	2472.25	892.30	185.29	26.86	1427.17

En la Tabla 7, es posible observar variaciones notorias entre las concentraciones de los elementos, principalmente Cl⁻ y NO₃⁻ (Gráfico 4), y al comparar los valores de composiciones químicas pre operacionales de TLS con las composiciones actuales, es posible interpretar que pozos se han visto influenciados por aguas del tranque. En el acuífero natural el anión dominante era el sulfato, el cual presenta concentraciones relativamente similares en las aguas de TLS. Producto del aumento en las concentraciones de cloruro y que el sulfato no se ve alterado, se considera el primero de estos como el anión dominante en las aguas de relaves.

Las concentraciones de nitrato pueden ocuparse como elemento diferenciador complementario, ya que la concentración promedio en el agua del TLS es considerablemente superior a la observada en las aguas del acuífero natural.

Además, al observar el Gráfico 4, es posible señalar que las concentraciones para Cl⁻ y NO₃⁻ tienen una tendencia química similar de acuerdo a su ubicación.

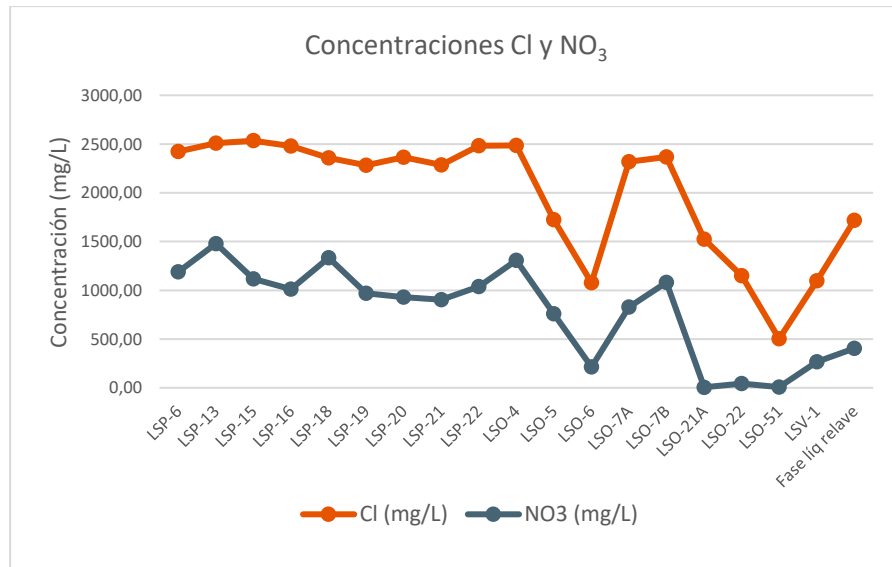


Gráfico 4: Concentraciones de Cl y NO₃

5.4.2.1 Diagramas de patrones hidroquímicos para LS

El propósito de los diagramas de patrones hidroquímicos es graficar la concentración absoluta o relativa de diferentes cationes y aniones en términos de mg/L o meq/L. Singhal & Gupta (2010) realizan una detallada descripción de diversos diagramas utilizados para representar las concentraciones o variaciones químicas del agua, estos incluyen Diagrama de barras Collins, Diagrama de Stiff, Diagrama de Schöeller, Diagrama de Hill – Piper, Diagrama de Durov, secciones hidroquímicas y diagrama circular.

El software EASYQUIM permite realizar cálculos de los balances químicos en análisis de calidad de agua y su posterior representación gráfica. Los datos se deben ingresar en mg/L y el software entregará los datos en meq/L, además de calcular los porcentajes de aniones y cationes, algunas relaciones iónicas, el error del balance iónico, Índice de intercambio de base (ICB), entre otros. Posteriormente, como *output* entrega los diagramas de Piper (Figura 23) y Schöeller. En la Tabla 8 se mencionan algunos de los parámetros entregados por el *software* EASYQUIM, en ella es posible observar que casi todos los puntos tienen un icb con valores negativos, lo que podría indicar que las aguas están relacionadas con terrenos formados por rocas plutónicas o volcánicas. En cuanto balance iónico, se observan valores entre los 0.66% y 6.5% de error, con un error aceptable de 5% (Appelo y Postma, 2005).

Tabla 8: Datos entregados por EASYQUIM.

Punto	icb	Kr	Error (%)	Punto	icb	kr	Error (%)
LSP-6	-0.19	4.47	3.67	LSO-5	-0.12	5.06	5.18
LSP-13	0.04	4.12	1.14	LSO-6	-0.49	5.83	4.63
LSP-15	-0.15	5.38	5.76	LSO-7A	-0.24	6.49	1.21
LSP-16	-0.13	5.32	6.5	LSO-7B	-0.29	4.55	6.34
LSP-18	0.04	4.89	6.08	LSO-21A	-0.26	5.32	0.66
LSP-19	-0.3	3.68	2.72	LSO-22	-0.23	4.56	-1.03
LSP-20	-0.2	3.7	2.2	LSO-51	-1.85	2.13	3.66
LSP-21	-0.24	3.46	1.8	LSV-1	-0.47	5.84	5.6
LSP-22	-0.19	3.74	2.01	Fase líq relave	-0.38	1.49	6.27
LSO-4	-0.26	3.57	1.43				

A continuación, se muestra la tabla de concentraciones en meq/L, ya que estos serán los valores a utilizar en los diagramas:

Tabla 9: Aniones y cationes mayoritarios en meq/L.

Punto	Aniones Mayoritarios				Cationes Mayoritarios			
	Cl meq/L	HCO ₃ meq/L	NO ₃ meq/L	SO ₄ meq/L	Ca meq/L	K meq/L	Mg meq/L	Na meq/L
LSP-6	68.25	1.50	19.16	48.95	39.57	2.43	22.35	78.57
LSP-13	70.68	1.22	23.85	40.28	46.57	2.17	22.75	66.00
LSP-15	71.37	1.95	18.01	47.93	40.83	2.40	24.37	79.82
LSP-16	69.83	1.94	16.30	46.46	39.76	2.49	24.46	76.74
LSP-18	66.44	1.57	21.53	40.39	47.18	1.78	27.31	61.68
LSP-19	64.25	1.18	15.64	53.88	35.63	2.66	19.45	80.85
LSP-20	66.57	1.15	14.98	50.71	38.04	2.45	18.14	77.66
LSP-21	64.38	1.06	14.57	52.91	36.69	2.59	18.40	77.58
LSP-22	69.92	1.18	16.75	48.49	37.47	2.46	18.60	80.49
LSO-4	70.06	1.10	21.09	51.69	37.57	2.61	20.03	85.71
LSO-5	48.54	1.92	12.25	48.49	35.15	2.05	27.36	52.41
LSO-6	30.31	2.61	3.47	55.26	29.15	1.48	21.44	43.82
LSO-7A	65.32	2.88	13.36	51.98	33.00	2.11	21.02	78.96
LSO-7B	66.74	1.58	17.43	49.93	37.58	2.62	20.77	83.51
LSO-21A	42.95	2.12	0.09	46.97	33.36	0.45	5.05	53.85
LSO-22	32.41	1.93	0.69	48.52	25.46	0.50	17.37	39.28
LSO-51	14.16	0.60	0.09	56.69	26.86	0.38	6.97	39.96
LSV-1	30.95	2.55	4.32	54.59	30.58	1.47	21.67	43.91
Fase líq relave	48.41	0.27	6.53	51.51	44.62	4.75	2.21	62.05

Es necesario transformar las concentraciones de mg/L a meq/L para trabajar con los diagramas de Piper y Schöeller, ya que las reacciones químicas se producen equivalente a equivalente, es decir, un equivalente de A reacciona con un equivalente de B, y en el agua la cantidad de miliequivalentes de aniones es igual a la de miliequivalentes de los cationes.

Desde el diagrama de Piper es posible interpretar que la composición de las aguas para el primer trimestre de 2020 es principalmente del tipo clorurada sódica y algunas muestras presentan una composición sulfatada cálcica a sulfatada sódica. Además, el pozo LSO-51 representa la composición química del acuífero natural y el diagrama de Piper permite identificar que tiene una mayor presencia de sulfatos, mientras que algunos pozos de la cortina de bombeo presentan una composición más clorurada.

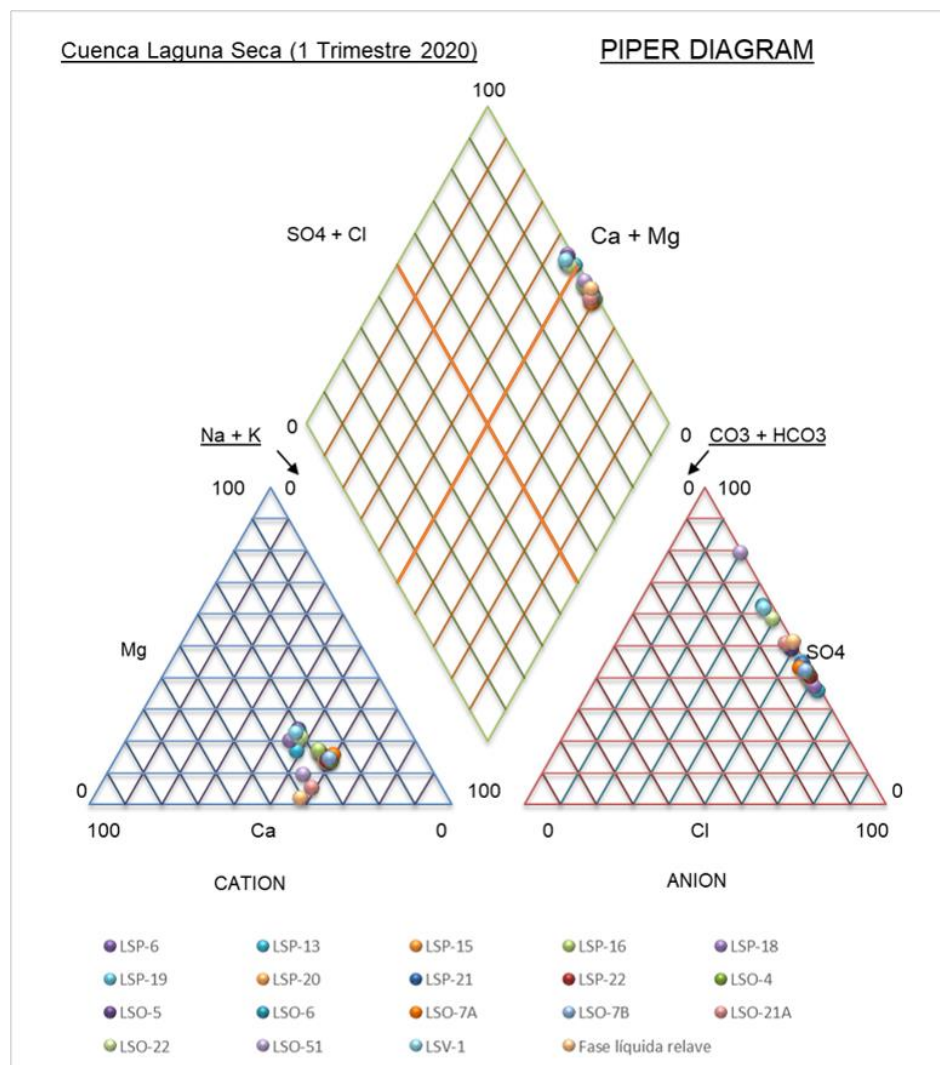


Figura 23: Diagrama de Piper para aguas TLS periodo enero-marzo 2020.

Para los Diagramas de Schöeller, se presentan las Figuras 24, 25a y 25b. El primer diagrama es una representación completa de todos los puntos de la Tabla 9, donde es posible observar que los elementos que exhiben una mayor variabilidad son Mg^{+2} , Cl^- y HCO_3^- .

Las Figuras 25a y 25b, presentan los mismos datos que la Figura 24, pero separados en dos grupos: La Figura 25a, muestra una gran similitud entre las concentraciones de los iones (meq/L). Los valores están unidos por líneas rectas de forma casi paralelas, lo que indicaría que el agua de los pozos del diagrama de la Figura 25a, presentan una composición química muy similar y podrían estar siendo afectados por los mismos procesos. Mientras que la Figura 25b, presenta una mayor variabilidad en sus datos, donde el pozo LSO-51 presenta el mayor valor para SO_4^{-2} y el menor valor de concentración para el Cl^- . La fase líquida de relave presenta elevadas concentraciones de Cl^- y las menores concentraciones Mg^{+2} y HCO_3^- . Ahora, bien aquellos pozos que presentan elevadas concentraciones de Cl^- , son aquellos que están directamente influenciados por aguas del TLS, ya sea, porque pertenecen a la cortina pozos de bombeo o por su proximidad al tranque.

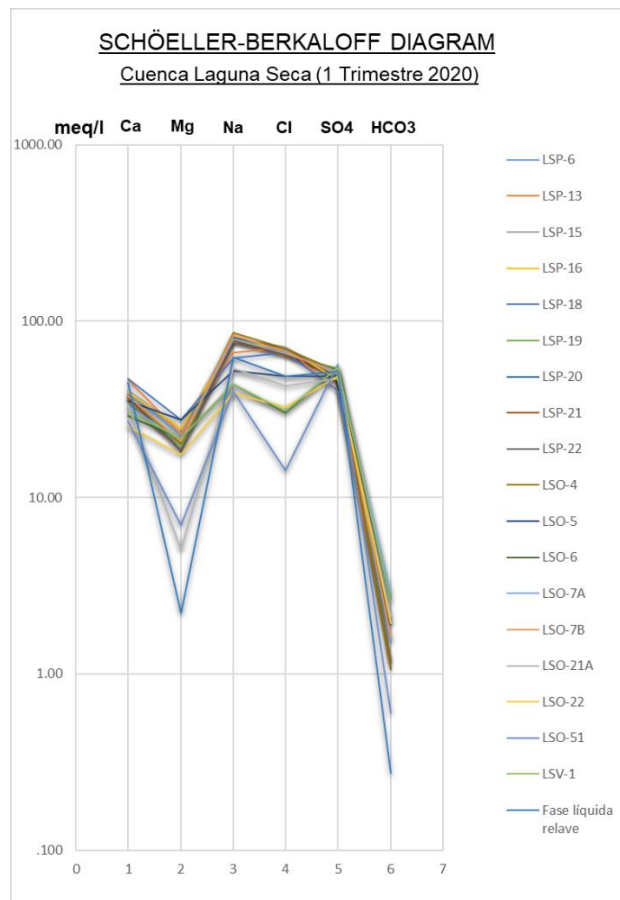


Figura 24: Diagrama de Schöeller para aguas TLS.

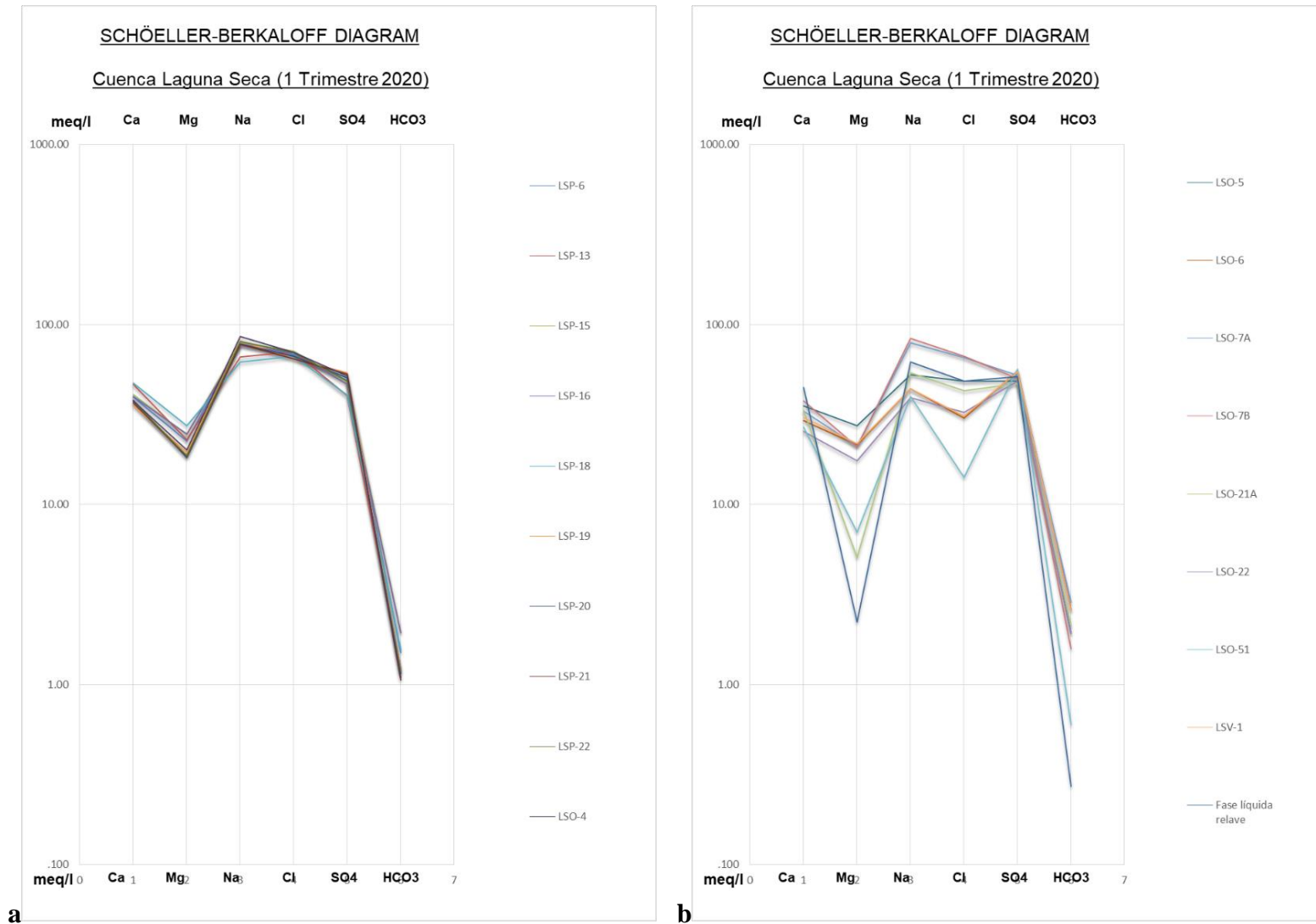


Figura 25: Diagramas de Schöeller (Grupos a y b, respectivamente).

5.4.2.2 Índices Hidroquímicos para LS

Los índices hidrogeoquímicos son relaciones entre los iones disueltos en agua, que pueden guardar cierta relación con el terreno de procedencia y pueden indicar la acción de fenómenos modificadores e incluso señalar direcciones de flujo, de acuerdo al aumento o disminución de las razones iónicas.

En la Tabla 10 se presentan las razones iónicas para los puntos, calculadas a partir de la Tabla 9.

Tabla 10: Índices hidroquímicos para LS.

Punto	Razones						
	Mg/Ca	K/Na	Cl/HCO ₃	SO ₄ /Cl	Na/Cl	Mg/Cl	SO ₄ /Ca
LSP-6	0.56	0.03	45.48	0.72	1.15	0.33	1.24
LSP-13	0.49	0.03	57.76	0.57	0.93	0.32	0.86
LSP-15	0.60	0.03	36.57	0.67	1.12	0.34	1.17
LSP-16	0.62	0.03	35.91	0.67	1.10	0.35	1.17
LSP-18	0.58	0.03	42.22	0.61	0.93	0.41	0.86
LSP-19	0.55	0.03	54.27	0.84	1.26	0.30	1.51
LSP-20	0.48	0.03	57.73	0.76	1.17	0.27	1.33
LSP-21	0.50	0.03	60.55	0.82	1.20	0.29	1.44
LSP-22	0.50	0.03	59.10	0.69	1.15	0.27	1.29
LSO-4	0.53	0.03	63.79	0.74	1.22	0.29	1.38
LSO-5	0.78	0.04	25.31	1.00	1.08	0.56	1.38
LSO-6	0.74	0.03	11.62	1.82	1.45	0.71	1.90
LSO-7A	0.64	0.03	22.71	0.80	1.21	0.32	1.58
LSO-7B	0.55	0.03	42.14	0.75	1.25	0.31	1.33
LSO-21A	0.15	0.01	20.23	1.09	1.25	0.12	1.41
LSO-22	0.68	0.01	16.78	1.50	1.21	0.54	1.91
LSO-51	0.26	0.01	23.58	4.00	2.82	0.49	2.11
LSV-1	0.71	0.03	12.13	1.76	1.42	0.70	1.79
Fase líq relave	0.05	0.08	177.18	1.06	1.28	0.05	1.15

Tres grupos de los índices hidrogeoquímicos presentados en la Tabla 10 fueron corroborados con el software EASYQUIM, los valores obtenidos por el software se encuentran en el Anexo 2.

A continuación, se muestra una serie de gráficos realizados, para evaluar uno a uno las tendencias de los índices hidrogeoquímicos:

Mg/Ca: El Gráfico 5, presenta valores que varían entre los 0.05 y 0.78. Esta relación se presenta relativamente estable en la mayoría de los puntos, ya que como se había mencionado en capítulos anteriores este valor debería presentar variaciones entre 0.3 y 1.5 para aguas continentales. Además, es posible observar un gran declive negativo para la fase líquida de los relaves, lo que sería correcto al considerar que no son agua de origen continental (BHP, 2020).

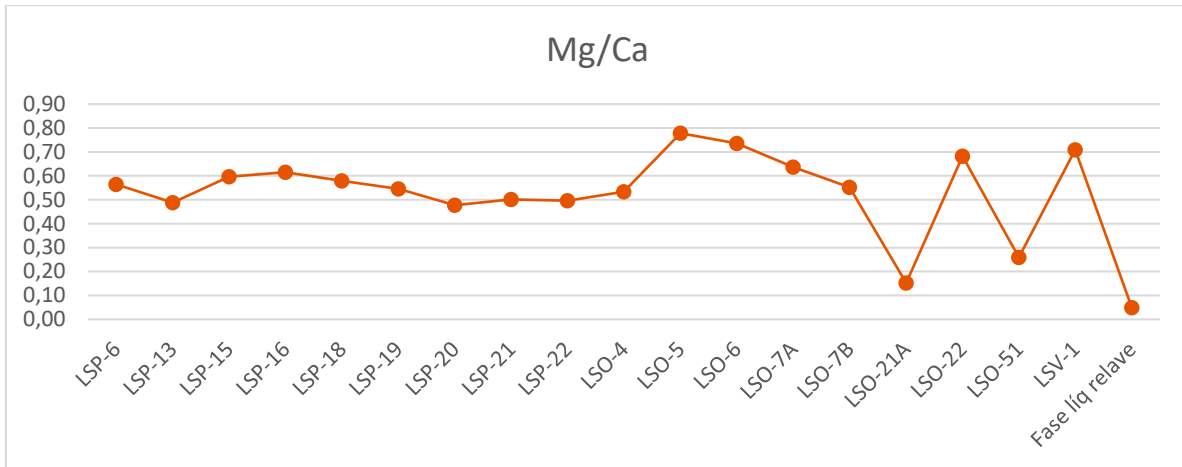


Gráfico 5: Índice Mg/Ca.

K/Na: El Gráfico 6 presenta valores que varían principalmente entre los 0.01 y 0.04, con un valor excepcional de 0.08 para la fase líquida del TLS. Esta irregularidad estaría dada por la alta concentración de K que presentan los relaves, valor que en meq/L es hasta cuatro veces mayor que en las concentraciones observadas en los otros puntos de muestreo.

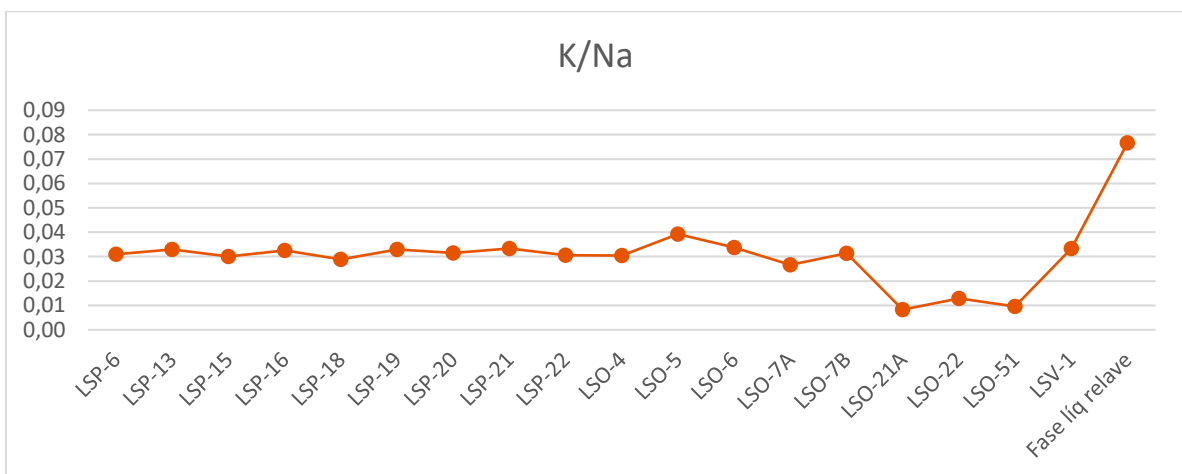


Gráfico 6: Índice K/Na.

Cl/HCO₃: El Gráfico 7 presenta valores que generalmente fluctúan entre 10 y 60, y excepcionalmente se tiene un valor de 177 para la fase líquida de los relaves. Considerando que las concentraciones de HCO₃ se mantienen relativamente constantes en todos los puntos medidos, el dato anómalo de TLS estaría influenciado por el alto aporte de cloruros desde los relaves.

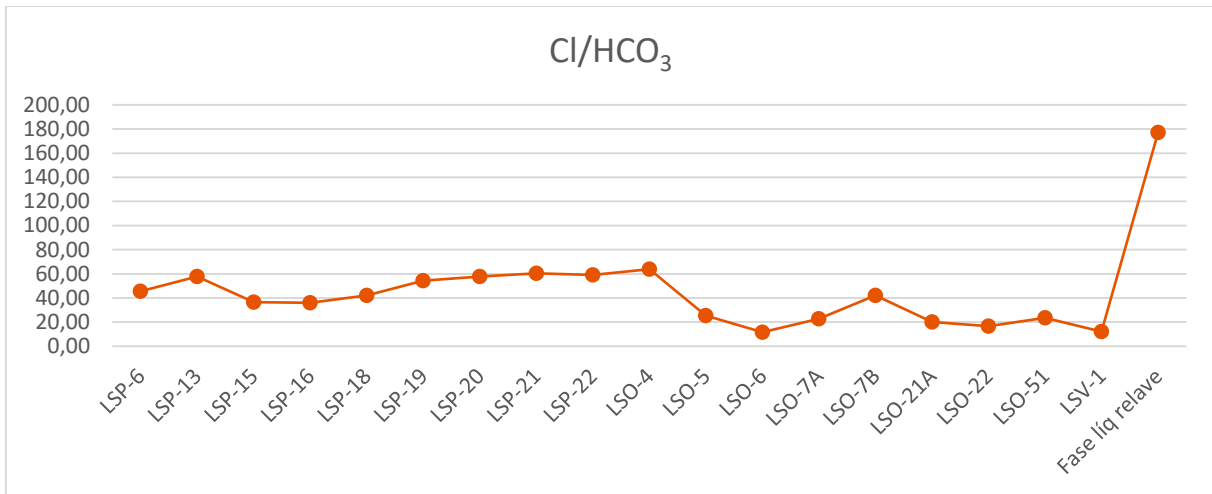


Gráfico 7: Índice Cl/HCO₃.

SO₄/Cl: El Gráfico 8 presenta variaciones que varían principalmente entre 0.5 y 2. De manera excepcional el pozo LSO-51 presenta un valor de 4, lo que podría indicar que este pozo no está influenciado por el aporte de cloruros que entrega el TLS.

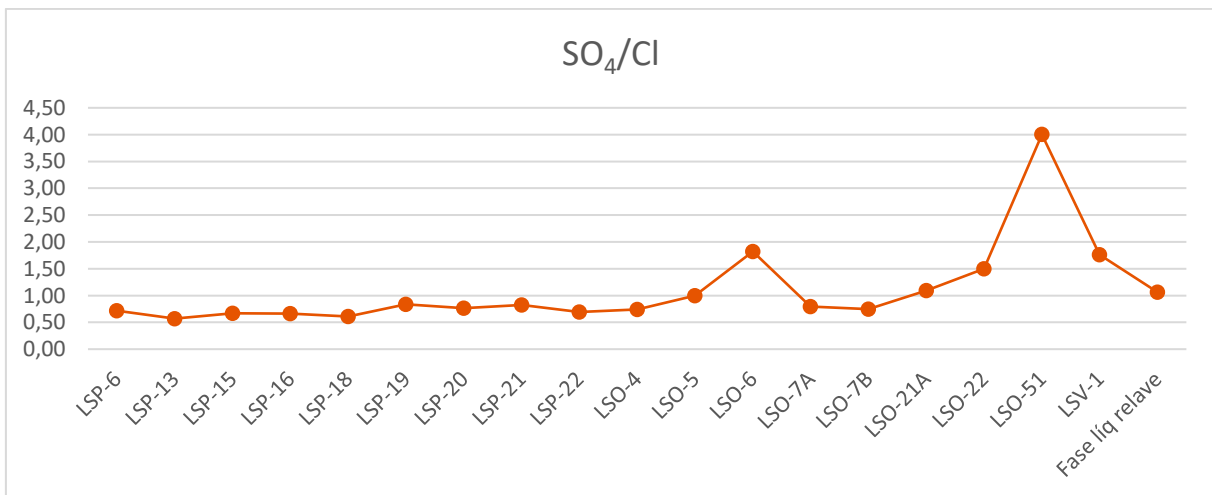


Gráfico 8: Índice SO₄/Cl.

Na/Cl: El Gráfico 9 presenta valores que aproximadamente varían entre 1 y 1.5. De manera similar al gráfico anterior, se presenta el pozo LSO-51 como un valor diferente (2.82), lo que estaría condicionado por la “baja” presencia de cloruros.

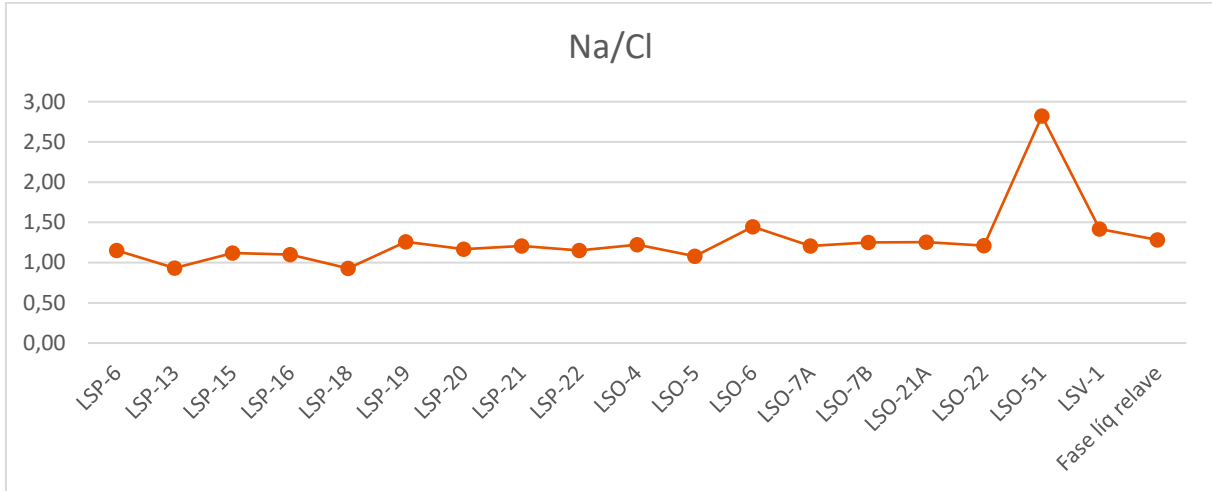


Gráfico 9: Índice Na/Cl.

Mg/Cl: El Gráfico 10 presenta valores que fluctúan entre 0.05 y 0.7, los valores más elevados de este índice podrían estar influenciados por la alteración de minerales ferromagnesianos presentes en las rocas intrusivas que se encuentran dentro y fuera del área de estudio. El menor valor (0.05) está dado por la fase líquida del relave, ya que presenta bajas concentraciones de magnesio y altas concentraciones de cloruro, siendo este valor concordante con lo observado en el Diagrama de Schöeller.

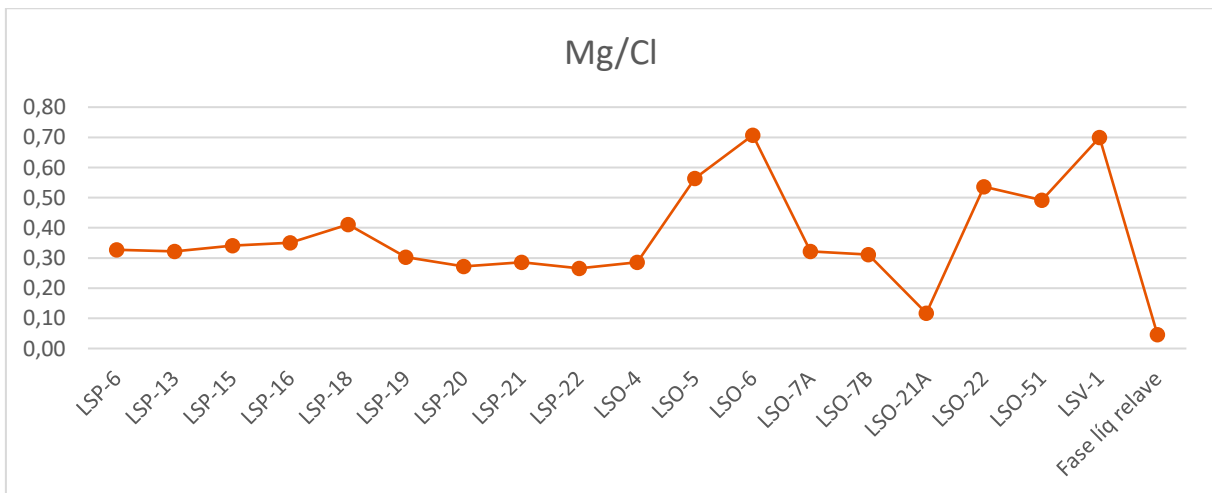


Gráfico 10: Índice Mg/Cl.

SO₄/Ca: El Gráfico 11 presenta valores relativamente homogéneos, que fluctúan entre 0.8 y 2.1, estabilidad que estaría dada por la escasa variación del ión SO₄ en el sistema.

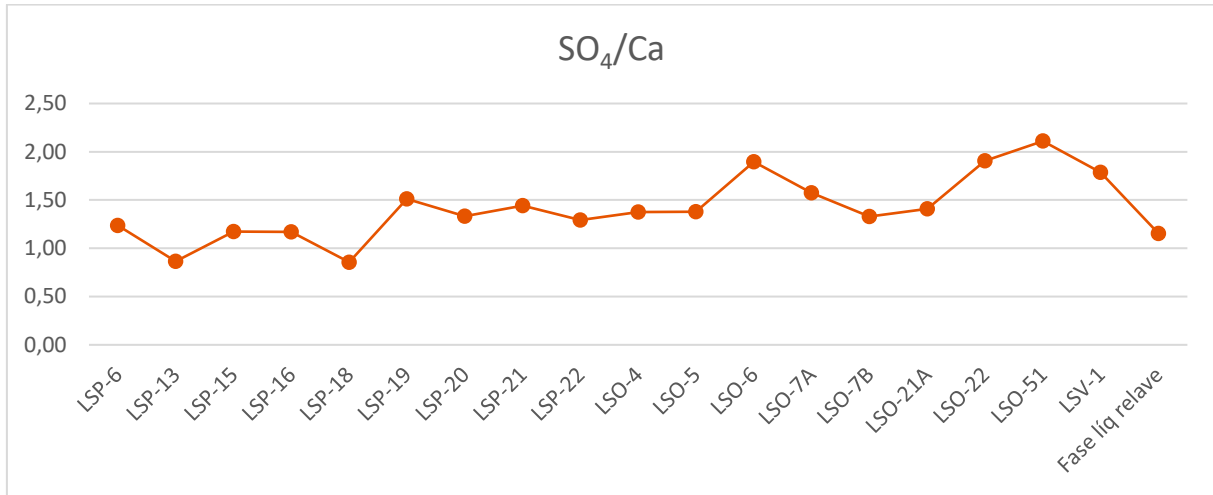


Gráfico 11: Índice SO₄/Ca.

De manera generalizada los índices hidrogeoquímicos sirven para verificar y dar solidez a los diagramas de patrones hidroquímicos, ya que, quedan en evidencia las variaciones composicionales de los distintos puntos analizados, en función de los procesos que pueden estar provocando estas variaciones.

5.4.2.3 Isótopos Estables

Los isótopos de un elemento en particular son aquellos que tienen el mismo número atómico pero diferentes pesos atómicos, ejemplo de ellos son ¹H, ²H y ³H; y estos pueden ser radioactivos o estables. Constantemente se incorpora una gran cantidad de radioisótopos al ciclo hidrológico, producidos naturalmente por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera. Además, hay una cierta cantidad de isótopos introducidos en el medio ambiente a través de pruebas de armas nucleares e instalaciones atómicas (Singhal & Gupta, 2010).

Los isótopos de hidrógeno y oxígeno, ²H, ³H y ¹⁸O, son trazadores naturales que dejan una huella isotópica en el agua y, por lo tanto, se utilizan para una variedad de propósitos en investigaciones hidrogeológicas, como trazadores, para la determinación de la edad y el origen del agua subterránea, la estimación de la recarga, las características hidráulicas y los procesos de transporte en los acuíferos (OIEA 1983, 1989; Clark y Fritz 1997; Kehew 2001; Aggarwal y otros 2005, en Singhal & Gupta, 2010).

Un isótopo estable es un nucleído que no es radiactivo (a diferencia de los radionucleidos), por lo que no experimenta de forma espontánea decaimiento radiactivo. Las razones isotópicas $^2\text{H}/^1\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, comparadas con un estándar mediante el parámetro “ δ ”, se usan para determinar la fuente de agua y su génesis (mezcla de aguas de diferente origen, procesos de salinización, etc.), mientras que $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ y $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ se usan en estudios de contaminación. Para las razones $^2\text{H}/^1\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, la referencia estándar normal es VSMOW, un acrónimo de Vienna Standard Mean Ocean Water (por ejemplo, $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = ((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{muestra}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}}) / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}}$).

La relación entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se utiliza para resolver una variedad de problemas hidrogeológicos basados en el fraccionamiento dependiendo de la altitud, la distancia del océano y la evaporación. Por ejemplo, el agua subterránea que tiene la fuente de recarga a grandes altitudes será más rica en isótopos más ligeros y puede distinguirse del agua subterránea recargada en altitudes más bajas. Por otro lado, la contribución de los cuerpos de agua superficiales como lagos, estanques y embalses, sometidos al proceso de evaporación, puede identificarse mediante el enriquecimiento en isótopos estables más pesados (Singhal & Gupta, 2010).

En la cuenca Laguna Seca se han estudiado los isótopos estables de oxígeno (^{18}O y ^{16}O) e hidrógeno (^2H y ^1H) de agua; y azufre (^{34}S y ^{32}S) y oxígeno (^{18}O y ^{16}O) de sulfato disuelto. Golder realizó dos campañas de muestreo de isótopos durante el 2017 (mayo y noviembre), con el fin de consolidar y complementar la interpretación de los datos de calidad de agua.

En el Gráfico 12 se presentan los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para algunos puntos de la cuenca Laguna Seca en mayo de 2017, los valores de $\delta^2\text{H}$ varían entre -58,7‰ y -25,9‰ y los valores de $\delta^{18}\text{O}$ varían entre -5,8‰ y -1,1‰, respecto al estándar (VSMOW). Todas las muestras presentan composiciones isotópicas por debajo de la línea meteórica mundial (GMWL, (Craig, 1961)). Esto se debe principalmente a la evaporación parcial de las precipitaciones antes de su infiltración a la cuenca, lo que desplaza la composición de las aguas subterráneas hacia la derecha de la GMWL/NCMWL (Golder, 2018). También, es posible mencionar que las composiciones isotópicas de las aguas de la cuenca presentan una alta variabilidad y es posible separarlas en 2 grupos. Del Gráfico 12 es posible señalar que los puntos naranjos ubicados a la izquierda del gráfico corresponden a composiciones isotópicas del acuífero natural, mientras que los puntos naranjos ubicados a la derecha presentan una huella isotópica representativa para las aguas de TLS.

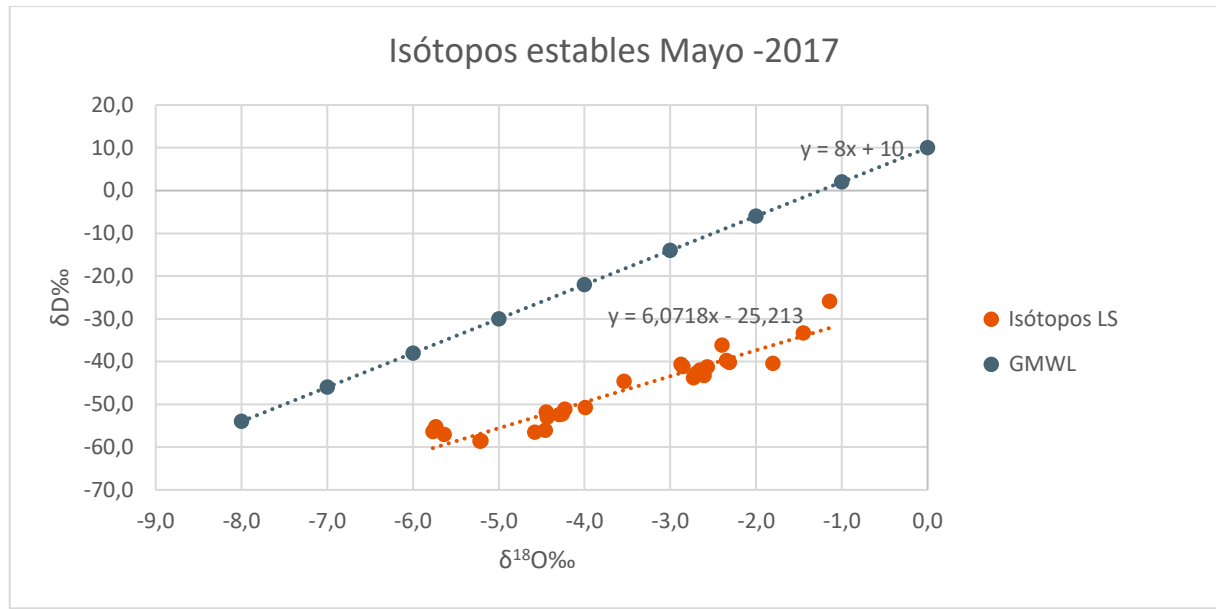


Gráfico 12. Isótopos estables de agua para mayo 2017.

En el Gráfico 13, se muestra el mismo análisis que en el en gráfico anterior, para datos de isótopos de noviembre de 2017. Esta vez, se agregan al gráfico la línea meteórica local para el norte de Chile (LMLNCh; (Boschetti y otros, 2019)). Estos datos presentan la misma tendencia que las muestras de mayo 2017, pero, además, es posible señalar que los datos de isótopos ubicados a la derecha presentan una mayor evaporación, lo que estaría influenciado por la evaporación que ocurre en la laguna y playas del tranque de relave.

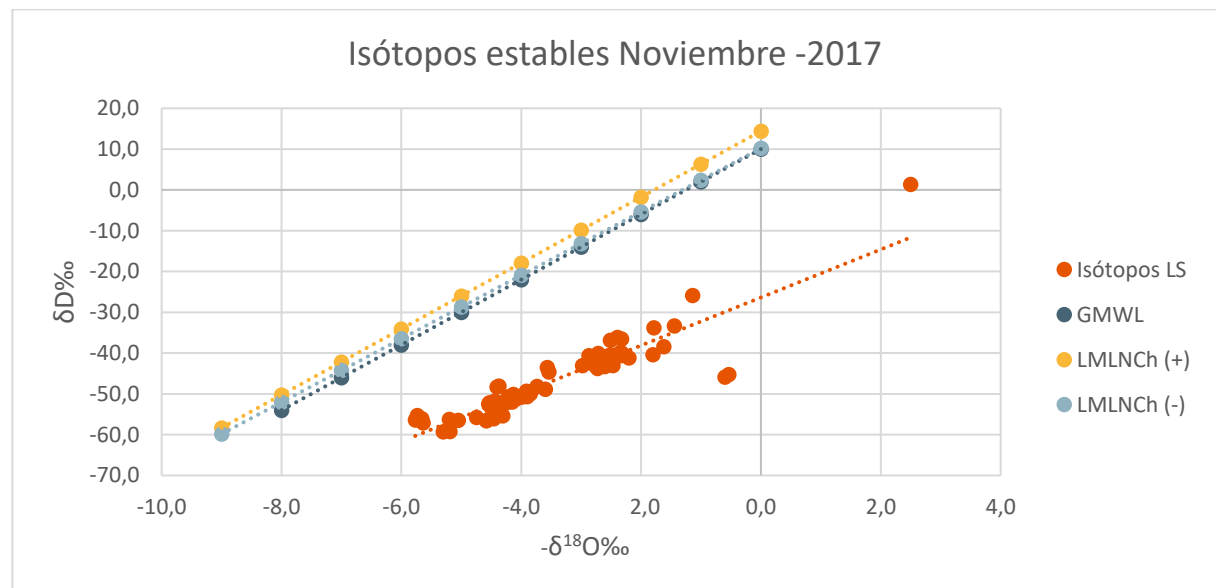


Gráfico 13. Isótopos estables de agua para noviembre 2017

5.5 GEOFÍSICA

Los métodos geofísicos proporcionan información sobre la distribución de determinados parámetros físicos en el subsuelo, los cuales pueden ser relacionados con observaciones directas. Por ejemplo, una muestra de arcilla o de granito tiene diferentes densidades, velocidad acústica, parámetros elásticos, conductividad eléctrica, susceptibilidad magnética y constante dieléctrica. Por lo tanto, los métodos geofísicos están diseñados para explorar alguna de las propiedades físicas de algún objetivo que está en contraste con la propiedad física del entorno. Los métodos geofísicos tienen la valiosa ventaja de ser métodos no destructivos ni invasivos que complementan las observaciones directas que proporcionan la geología e hidrogeología de una región (Boujón, 2014).

El Georradar (GPR) y los métodos eléctricos, tales como la Tomografía Eléctrica (TE) y el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), son especialmente útiles para estudios ambientales, debido a la naturaleza conductora de la mayoría de los contaminantes (Boujón, 2014), y pueden ser herramientas importantes para la detección y mapeo de flujos contaminados, residuos enterrados, u otras estructuras subterráneas.

5.5.1 Métodos Geoelectricos

El objetivo de los métodos geoelectricos es determinar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo. Estos métodos han sido utilizados por muchas décadas en hidrogeología, minería e investigaciones geoquímicas y más recientemente, ha sido utilizado para estudios ambientales.

Las medidas de la resistividad son normalmente realizadas utilizando una fuente artificial de corriente continua que es inyectada a la tierra a través de un par de electrodos A y B y se realizan mediciones de la diferencia de potencial (V) en otros dos electrodos M y N –sensores- cuyas posiciones se eligen convenientemente. A partir de la intensidad de la corriente (I), la diferencia de potencial (V) y un factor geométrico (k) que depende del arreglo de electrodos, se calcula la resistividad aparente (ρ_a) del subsuelo (4) (Boujón, 2014).

$$\rho_a = k * V/I \quad (4)$$

Los resistivímetros, normalmente dan un valor de resistencia (R) donde $R = V/I$, entonces en la práctica el valor de la resistividad aparente (ρ_a) es calculado por:

$$\rho_a = k * R \quad (5)$$

El valor de resistividad calculado, no es la resistividad real del subsuelo ya que, en presencia de un suelo no homogéneo, la corriente pasa por diferentes medios con distintas resistividades, resultando una resistividad aparente (ρ_a). Solamente, en el caso de estar en presencia de un medio de resistividad uniforme, la resistividad real es igual a la aparente. La ρ_a no es una propiedad física de los distintos medios subsuperficiales, ni es un valor medio, sino que depende de la distribución de las resistividades reales del subsuelo y de la disposición de electrodos utilizada (Boujón, 2014)

5.5.1.1 Tomografía Eléctrica 2D

Una Tomografía Eléctrica (TE) provee una imagen 2D de la distribución del potencial eléctrico, que permite la reconstrucción de la resistividad eléctrica asociada a los diferentes materiales o litologías que conforman el subsuelo. Los modelos 2D asumen muy poca variación en la tercera dimensión. Prospecciones 3D involucran una gran cantidad de mediciones y de procesamiento de datos. Este método tiene muchas aplicaciones en geología, hidrogeología y en estudios ambientales (Boujón, 2014).

En el área de estudio se han realizado una serie de campañas geofísicas desde el año 2001. Se realizan de manera regular levantamientos geofísicos en el sector aguas abajo del muro, como complemento para la posible visualización de cambios en los niveles y comportamiento de flujos de agua. En primera instancia, estos levantamientos estuvieron a cargo de la empresa Zonge Geofísica, quienes realizaron levantamientos del tipo NanoTEM en tres perfiles. En los años 2006, 2011, 2012, 2016 y 2017 se realizaron levantamientos de tomografía de resistividad eléctrica, los cuales se realizan de manera sistemática para evaluar el comportamiento del acuífero, de esta manera se tienen 5 perfiles ubicados aguas abajo del muro, 3 perfiles en la zona sur y 4 perfiles en la zona norte (Figura 26). Con respecto estos perfiles, Golder (2018) señala que:

- Se identificó una capa resistiva somera ($R > 500 \Omega/m$) en todos los perfiles asociada a la zona no saturada.

- En la mayoría de los perfiles, hay una buena correlación entre el nivel freático y la presencia de una capa conductora ($R < 20 \Omega/m$).

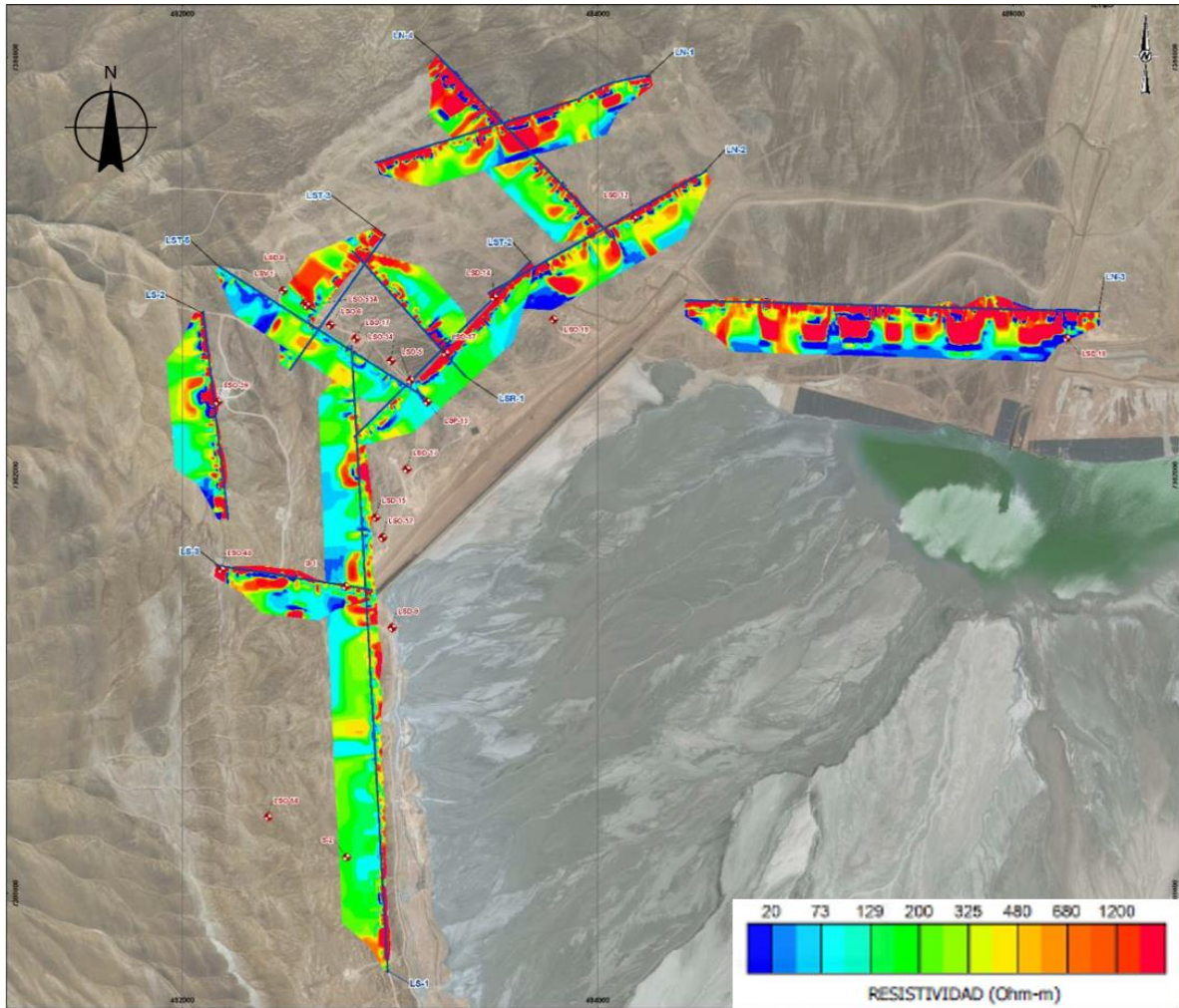


Figura 26: Perfiles de tomografía eléctrica en sector bajo el muro del TLS (Golder,2018).

- El cruce de perfiles de resistividad con niveles de agua muestra que existen zonas saturadas con altos valores de resistividad. Asimismo, se identificaron zonas de baja resistividad en zonas no saturadas, sobre el nivel freático medido. Se desprende, de esta forma, que los contrastes de resistividad pueden asociarse a cambios en la litología, lo que, a su vez, de manera indirecta, pueden estar vinculados con zonas de mayor o menor permeabilidad. Esto implica la necesidad de, una vez realizada los perfiles de tomografía eléctrica, sus resultados deben ser complementados con información de campo adicional (sondajes, ensayos hidráulicos, muestreo de calidad de aguas y/o isótopos).

6. HIDROGEOLOGÍA

Según SEA (2012) la elaboración de un modelo conceptual debe ser el punto de partida en la construcción de cualquier modelo hidrogeológico. En esta etapa se representan en forma simplificada los elementos más importantes del sistema físico y su comportamiento, basándose en todos los antecedentes técnicos disponibles (geología, hidrología, hidrogeoquímica e hidrogeología). Asimismo, dependiendo de la cantidad y calidad de dichos antecedentes, quedan definidos en esta etapa los alcances de la futura modelación, sus limitaciones y la precisión esperada de los resultados.

De acuerdo a la naturaleza física del flujo del agua subterránea, la modelación conceptual de un sistema hidrogeológico debe incluir como mínimo la caracterización de la geometría del acuífero, los parámetros hidrogeológicos que lo representan, las entradas y salidas del sistema, la piezometría (sentido del flujo), el tipo de acuífero(s) y la hidrogeoquímica. Por último, considerando todos los atributos en conjunto, se debe establecer un balance hídrico preliminar (SEA, 2012).

6.1 MODELO CONCEPTUAL LAGUNA SECA

6.1.1 Dominio del Modelo

Al realizar el modelo conceptual de la cuenca Laguna Seca, en primer lugar, se define el dominio del modelo, para esto se consideran los límites marcados por la divisoria hidrológica de la cuenca. Luego, se asume que la divisoria de aguas hidrológica coincide con la divisoria de aguas subterráneas, definiendo el límite del modelo en gran parte de su extensión, exceptuando la zona oeste, donde se produce la salida del flujo subterráneo, y la divisoria hidrológica estaría influenciada por el funcionamiento del TLS.

Considerando lo anterior, los límites del dominio del modelo quedan definidos de la siguiente manera (Figura 10):

- Límite norte-noroeste: definido por la divisoria de aguas con la cuenca de Hamburgo y la prolongación de esta hacia el oeste.
- Límite este-sureste: definido por la divisoria de aguas asociada al cordón montañoso que separa la cuenca Laguna Seca de la cuenca del Salar de Punta Negra.

- Límite sur: definido por la divisoria de aguas asociada al cordón montañoso que separa la cuenca Laguna Seca de la depresión geográfica que se extiende hacia el oeste.
- Límite oeste: definido por el sector en el que se reconoció el alzamiento del miembro inferior de la formación El Profeta.
- Límite suroeste: borde conecta límite oeste con límite sur, ubicado aproximadamente a unos 5 km del muro, y que se define siguiendo la topografía de los límites las quebradas del sector que se desarrollan en dirección este-oeste.
- Límite inferior: se definió un espesor constante de 800 m sobre la topografía natural del terreno. Se estima que este espesor permite representar adecuadamente la geometría de las unidades hidrogeológicas definidas en el modelo. Al ser constante el espesor, se mantiene la transmisividad en todo el dominio.

6.1.2 Condiciones de Borde

En primer lugar, se define una condición de no flujo para los límites de la cuenca. El límite de la cuenca hidrológica establece una condición de borde natural del flujo subterráneo, asumiendo que ambas cuencas (hidrológica y subterránea) coinciden. De esta forma, se considera que todos los límites del modelo, exceptuando el límite oeste, corresponden a zonas donde el flujo subterráneo es nulo. En la Figura 27, se expone una representación esquemática de las condiciones de borde del modelo.

A continuación, se describe de manera conceptual los componentes principales del balance de aguas.

La recarga del sistema se produce mediante dos mecanismos:

Precipitaciones: aunque se trata de una zona de extrema aridez, los antecedentes analizados permiten inferir que se produce una recarga natural producto de las infiltraciones debidas a la escasa precipitación en la zona. En términos medios anuales, y descontando las pérdidas por evaporación, se estima que esta recarga podría alcanzar valores de hasta 0,75 mm/año.

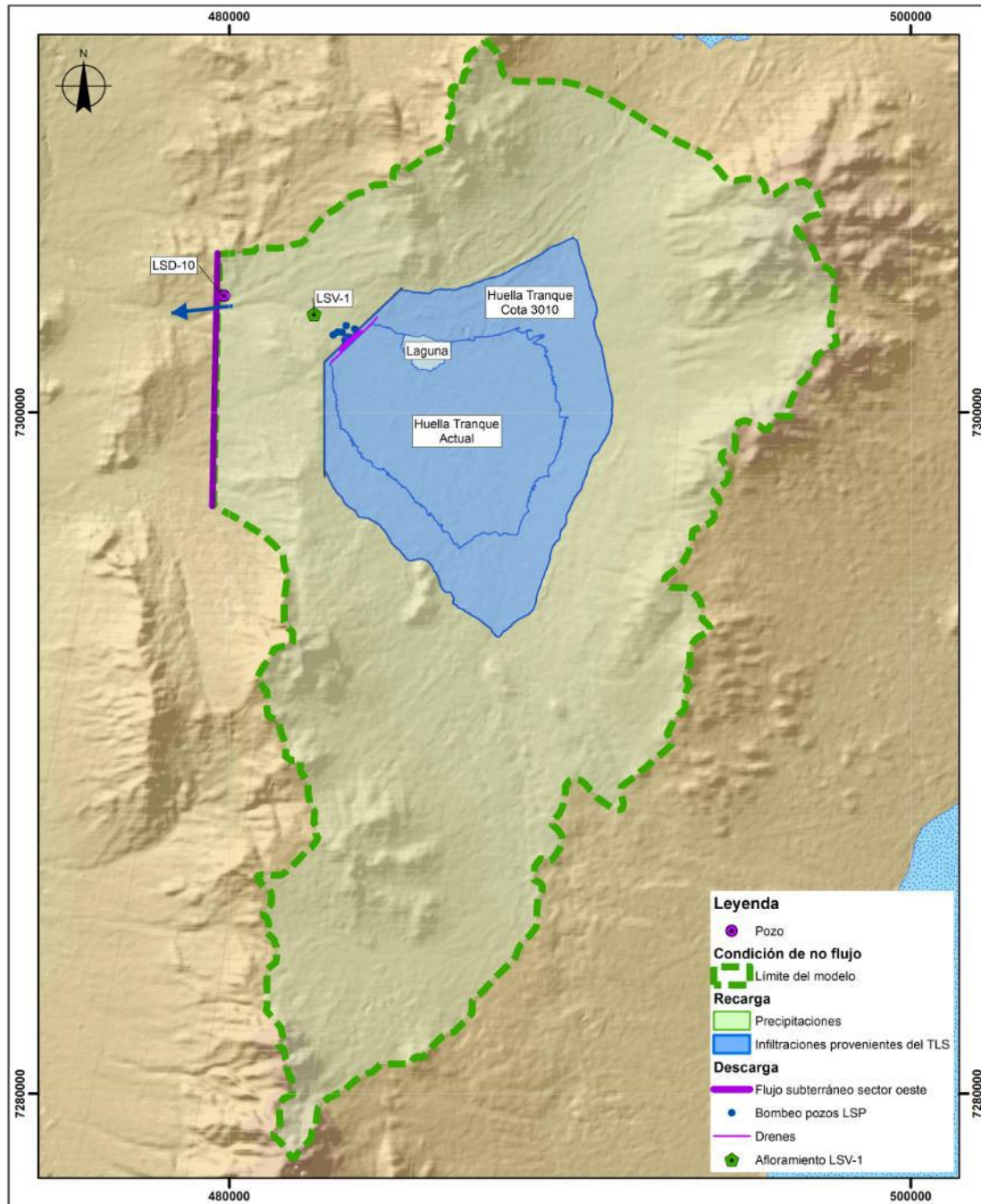


Figura 27. Vista en planta esquemática con las condiciones de borde de la cuenca LS (Golder, 2018).

Aportes desde TLS: a partir del inicio de la operación del TLS, la principal recarga del sistema la constituyen los ingresos de agua desde los relaves. A partir de las estimaciones realizadas con el balance operacional del sistema, el flujo promedio de esta componente podría oscilar en términos medios anuales. Conceptualmente, en este flujo no se incluye las pérdidas de agua por evaporación y retención en los relaves, con la intención de simplificar el modelo.

Las descargas del sistema son las siguientes:

Flujo subterráneo a través del límite oeste de la cuenca: este corresponde al flujo saliente del modelo a través de la quebrada principal aguas abajo pozo LSD-10.

Bombeo pozos LSP: corresponde al flujo bombeado por los pozos de la serie LSP, que conforman la cortina hidráulica ubicada inmediatamente aguas abajo del muro del TLS.

Drenes: corresponde al sistema de drenaje ubicado al pie del muro.

Afloramiento LSV-1: es la descarga que se produce al sistema superficial en la vertiente ubicada aproximadamente 1,4 km aguas abajo del muro del TLS. Se considera que este caudal abandona el sistema subterráneo.

6.1.3 Unidades Hidrogeológicas

Según el Reglamento de la Administración Pública del Agua y la Planificación Hidrológica de España (1988) “Por unidad hidrogeológica se entiende como uno o varios acuíferos agrupados a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua”. La definición de unidades hidrogeológicas tiene como objetivo caracterizar o conceptualizar tendencias del comportamiento hidrogeológico y/o incluso hidroquímico de una cuenca. Estas unidades se pueden definir después de realizar un estudio geológico y pueden o no incluir más de una unidad geológica o viceversa.

Según SEA (2012) la caracterización de las unidades hidrogeológicas debe incluir el tipo de litología y su relación con las unidades geológicas, considerando su disposición estratigráfica, geometría y relaciones de contacto, además de sus características hidráulicas principales como conductividad hidráulica (K), almacenamiento (S) y porosidad efectiva (n). Para cada unidad hidrogeológica estos parámetros fluctúan dentro de un rango, que debería ser consistente con los valores derivados de las pruebas, ensayos realizados en terreno y la literatura. Además, dependiendo de la cantidad y calidad de información disponible, se podría estimar el caudal que circula por cada unidad hidrogeológica.

De acuerdo a lo anterior, Golder (2018) define 7 unidades hidrogeológicas para la cuenca Laguna Seca, compuestas por cinco unidades de roca, una unidad de suelos y una de relaves. Las cuales se caracterizan principalmente en base a las litologías, tamaño (extensión y espesor), distribución de

las unidades de roca o sedimento, transmisividad, conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento. Además, se da énfasis a las características de los pliegues y las fallas regionales y locales que afectan a las unidades geológicas de la cuenca, como variables que podrían definir zonas con una mayor o menor permeabilidad dentro de una misma unidad hidrogeológica.

Para crear el modelo conceptual, Golder (2018) adopta los siguientes criterios generales para la definición de las unidades hidrogeológicas:

- Se adoptará el enfoque de medio poroso equivalente, es decir, cada unidad será representada como un medio continuo (no discreto), con un set de parámetros hidráulicos característicos.
- Las heterogeneidades de las unidades, asociadas a los distintos grados de fracturamiento, podrán eventualmente definir zonas de mayor o menor permeabilidad dentro de una misma unidad hidrogeológica. Los parámetros hidráulicos de dichas zonas deben mantenerse dentro de los rangos definidos para esa unidad hidrogeológica.
- Se incorpora dentro de la conceptualización la geometría definida por la presencia de las fallas inversas a escala regional (diagrama de bloques). Se considera que este rasgo del sistema es relevante, toda vez que pone en contacto unidades de distintas características hidrogeológicas.

A continuación, se presentan la caracterización de las unidades hidrogeológicas definidas como parte de la conceptualización del sistema. La Figura 28 muestra una vista en planta de la disposición de las unidades dentro del dominio del modelo.

Unidad 1: Sedimentos no consolidados

Está conformada por depósitos coluviales y aluviales reconocidos en la geología regional y en los sondeos perforados en el centro de la cuenca. Desde el punto de vista hidrogeológico, no existen antecedentes suficientes para poder anticipar un comportamiento diferenciado entre los depósitos coluviales y aluviales, por lo que en esta conceptualización han sido agregados en la misma unidad hidrogeológica.

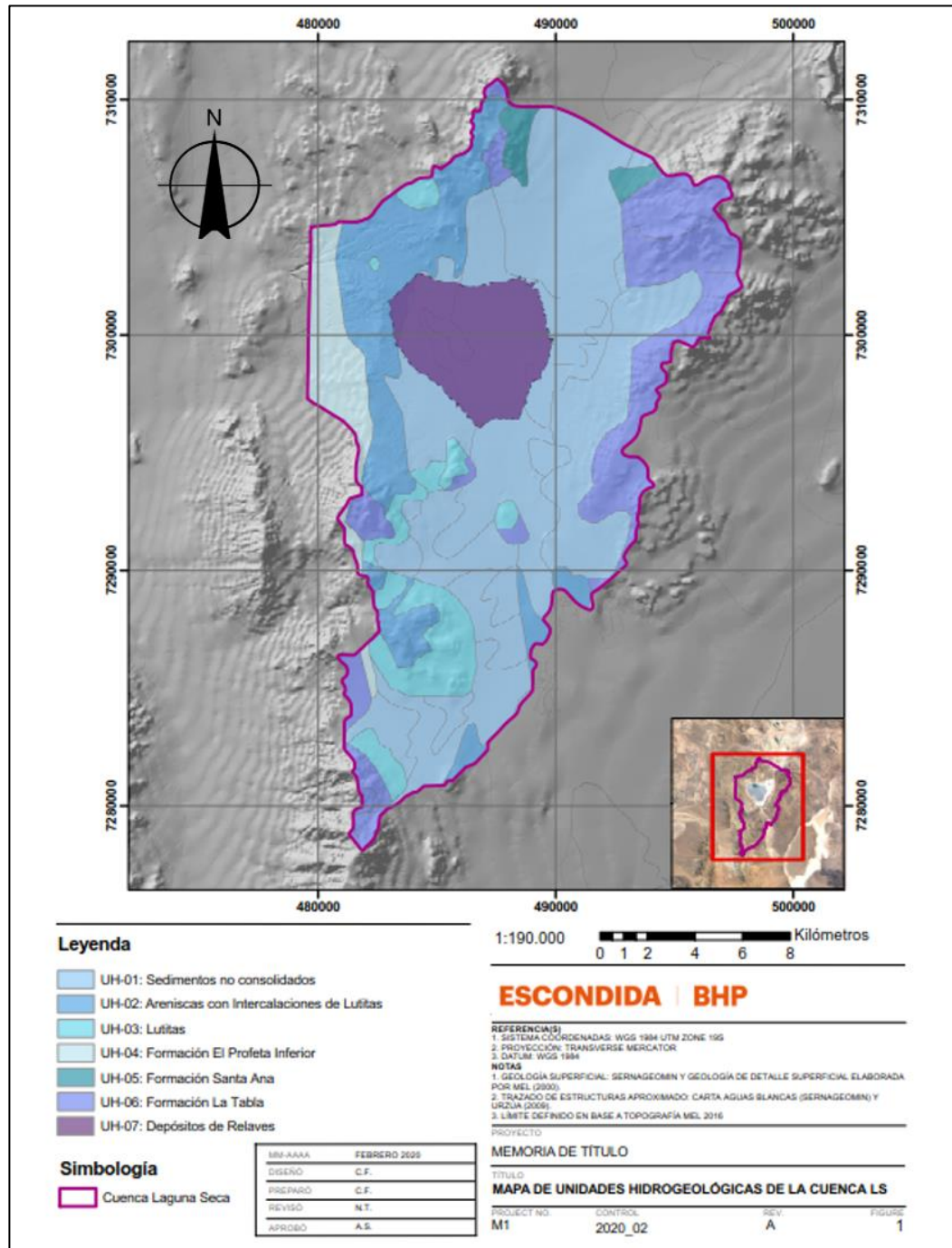


Figura 28: Unidades Hidrogeológicas de la cuenca Laguna Seca (Modificado de Golder, 2018)

Esta unidad se extiende superficialmente en gran parte del dominio del modelo. En el centro de la cuenca, en torno a la huella de los relaves, alcanza sus mayores profundidades, llegando hasta potencias de entre 150 y 200 m. La unidad tiende a acuñarse al aproximarse hacia los límites del modelo; de hecho, hacia el oeste, esta unidad desaparece inmediatamente aguas abajo del muro del TLS.

Estos depósitos presentan las mejores condiciones para la transmisión y almacenamiento de agua entre las unidades hidrogeológicas del modelo. Considerando el hecho de que la cubeta del TLS la sobreyace, la Unidad 1 es la principal receptora de las infiltraciones provenientes de los relaves, por lo que se espera que una parte de estas esté siendo almacenada en ella.

Unidad 2: Areniscas con intercalaciones de lutitas

Esta unidad corresponde a la combinación de las unidades geológicas de areniscas (J1m-Ar) y de areniscas con intercalaciones de lutita (J1m-In), ambas unidades pertenecen al Miembro Superior de la Formación El Profeta.

Estas se han agrupado en una sola unidad hidrogeológica debido a que, de acuerdo al análisis de mapeos de sondajes y ensayos hidráulicos, ambas presentan características hidrogeológicas similares en términos de tipo litológico, grado de fracturamiento y valores de sus parámetros hidráulicos.

La unidad aflora en las inmediaciones del muro del TLS, mientras que en el área de la cubeta del TLS se encuentra cubierta por la Unidad 1. Desde el punto de vista estructural, aguas abajo del muro se presenta fuertemente plegada y fracturada. Los ensayos hidráulicos realizados en la unidad presentan, en algunos casos, valores máximos similares a los de la Unidad 1. Esto se explica debido al alto grado de fracturamiento que se observa en sectores específicos de la unidad, como por ejemplo bajo la traza del muro.

Al estar en contacto con la Unidad 1, la Unidad 2 es el principal canal del flujo subterráneo aguas abajo del muro, debido a las características antes mencionadas. Si bien los flujos provenientes del TLS se descargan principalmente en la Unidad 1, es a través de la Unidad 2 que son conducidas aguas abajo del muro por la continuidad hidráulica que existe entre ambas.

Como se muestra en las secciones hidrogeológicas, en el centro de la cuenca y en las inmediaciones del muro, la Unidad 2 presenta una potencia media del orden de 50 a 60 m. Hacia el oeste, esta unidad pierde potencia, y posteriormente desaparece al ser afectada por dos fallas inversas regionales pertenecientes al conjunto de fallas de rumbo NW-NE. Hacia aguas abajo de la primera de estas fallas, la potencia de la unidad se reduce, lo cual se produce aproximadamente en el mismo sector donde aparece el afloramiento LSV-1. La potencia de la unidad entre ambas fallas inversas

es variable en relación al plegamiento antes descrito, pero sigue siendo menor a la observada aguas arriba de la primera falla. Aguas abajo de la segunda falla inversa, esta unidad desaparece, pues el bloque colgante eleva hasta la superficie al Miembro Inferior de la Formación El Profeta.

Unidad 3: Lutitas

Corresponde a la unidad de lutitas masivas (J1m-Lu) que subyace a la Unidad 2 (areniscas con intercalaciones de lutitas), formando parte también del miembro superior de la Formación El Profeta. De manera similar a la Unidad 2, la Unidad 3 presenta un intenso plegamiento, pero se le reconoce un menor grado de fracturamiento y una mayor compactación. Consiguientemente, la Unidad 3 tiene una menor capacidad de transmisión de agua que la Unidad 2, presentando conductividades hidráulicas medias a bajas. En ese sentido, la Unidad 3 tiene una menor importancia relativa en términos de flujo subterráneo y, por tanto, en la movilización de los flujos provenientes desde el TLS.

Se espera que las capas más superficiales de la Unidad 3, vale decir, los primeros 50 a 80 m bajo el contacto con la Unidad 2, sean más permeables que su capa más profunda, teniendo en cuenta que el fracturamiento decrece en profundidad según lo mostrado por el mapeo de los sondajes existentes. La Unidad 3 presenta zonas con fracturamiento en algunos sectores asociados a posibles estructuras y la intrusión de vetas de calcita y yeso. Estas fracturas se encuentran selladas por estos mismos minerales, por lo que no se espera un aumento de su permeabilidad asociado a esta característica. En base a los antecedentes geológicos regional, se estima que la Unidad 3 posee espesores máximos superiores a 500 m. La mayoría de los sondajes existentes no alcanza la base de la misma. Al igual que la Unidad 2, la Unidad 3 pierde potencia hacia el oeste por la existencia de 2 fallas inversas. Desaparece aguas abajo de la segunda de estas fallas, donde se eleva el Miembro Inferior de la Formación El Profeta.

Unidad 4: Formación El Profeta Inferior

Corresponde a una unidad de areniscas con lentes de conglomerados que aflora aproximadamente hacia el oeste de una falla inversa que pone en contacto ambos miembros de la formación El Profeta. En base a los antecedentes geológicos regionales y a la información de los sondajes, se ha interpretado que esta unidad está sometida al mismo plegamiento que las unidades pertenecientes

al Miembro Superior de La Formación El Profeta. Se estima que su espesor podría alcanzar hasta 800 m (Urzúa, 2009). Los sondajes LSD-7 y LSD-17 interceptan el contacto de esta unidad con la Unidad 3 aguas abajo de la primera falla inversa ubicada hacia el oeste del muro del TLS; no se dispone de sondajes que hayan alcanzado la base de esta unidad. En términos de fracturamiento, la unidad presenta una capa superficial fracturada de hasta 2 m bajo la cual presenta un alto grado de competencia y escasas zonas de fracturamiento. No se dispone de ensayos hidráulicos en la unidad, pero se estima que posee escasa capacidad de almacenamiento y asociada a una conductividad hidráulica baja o muy baja, la que eventualmente podría ser mayor en las capas más superficiales debido el fracturamiento decrece en profundidad. Lo anterior permite inferir que la Unidad 4 tiene muy poca importancia relativa en términos de transmitir el flujo subterráneo, y que su incidencia en la movilización de flujos provenientes del TLS sólo ocurriría aguas abajo de la segunda falla inversa, donde la unidad se alza y aparece superficialmente.

Unidad 5: Formación Santa Ana

Esta unidad corresponde a una secuencia de rocas sedimentarias que se restringe exclusivamente al área norte del dominio del modelo. Sus afloramientos son muy limitados, observándose estos únicamente en el sector norte del dominio del modelo, en el límite con la cuenca de Hamburgo.

La Unidad 5 corresponde a un bloque separado por fallas inversas. Se identificó sólo en sondajes de aire reverso, por lo que no se dispone de información sobre el grado de fracturamiento que afecta a la unidad. Dado que presenta características litológicas similares a la Unidad 2 (areniscas con intercalaciones de lutita), se asume que tendría un comportamiento hidráulico similar a esta. Al encontrarse aguas arriba del TLS, se estima que tiene incidencia limitada en cuanto a la movilización de los flujos de agua provenientes desde el TLS.

Unidad 6: Formación La Tabla

Comprende la unidad geológica de la Formación La Tabla, compuesta por rocas altamente consolidadas de edad paleozoica a mesozoica. Si bien no hay ensayos hidráulicos en esta unidad, debido a sus características litológicas se le asigna una conductividad hidráulica baja a nula.

Esta unidad aflora hacia el extremo este del dominio del modelo, producto del alzamiento del bloque asociado a la Falla Escondida. La Unidad 6 ha sido reconocida en sondajes de exploración

perforados en el sector sureste del modelo. No se ha identificado información ni bibliográfica ni de campo que permita definir un espesor que la caracterice. La Unidad 6 actualmente tiene una importancia limitada sobre el flujo subterráneo en la cuenca y, por tanto, sobre la movilización de aguas provenientes del TLS.

Unidad 7: Relaves

Los relaves depositados en el TLS han sido considerados en el modelo como una unidad hidrogeológica dado que condicionan directamente la magnitud de las infiltraciones hacia las unidades subyacentes a partir de 3 factores principales: geometría del depósito y su evolución en el tiempo, su grado de saturación, y su conductividad hidráulica.

La geometría del depósito y como ha ido este evolucionando en el tiempo se reconstruyó a partir de imágenes satelitales y los registros históricos de descarga de los relaves. Al inicio de la operación, los relaves fueron depositados en el sector más bajo de la cuenca, en contacto directo con el terreno natural. De esta forma, es esperable que las tasas iniciales de flujos de agua al acuífero (por unidad de área) sean las más altas de todo el período.

Entre los años 2002 y 2009, la superficie del depósito experimentó un rápido crecimiento. A partir del 2009, el crecimiento en superficie del relave ha sido relativamente menor, lo que implica que desde ese año las descargas se han ido depositando mayormente sobre los relaves previamente depositados. Como consecuencia, se ha ido produciendo un proceso de consolidación de los relaves, que a su vez genera una disminución de su conductividad hidráulica. Este proceso se acentúa en las capas más profundas del relave, donde el efecto de la consolidación es mayor.

Por otra parte, la saturación de esta unidad no es homogénea. En sus capas más superficiales, existen bajos grados de saturación debido al efecto de la evaporación. A mayor profundidad, los grados de saturación aumentan, por lo que es esperable que sea en estos sectores donde se produzca el mayor aporte de fluidos hacia el acuífero. Asimismo, la saturación también aumentará en las zonas más cercanas a la laguna de aguas claras. Teniendo en cuenta estos factores, además de la geometría del relave y la forma en la que se ha ido depositando, se espera que los relaves de mayor saturación y, por tanto, los que generan mayor circulación de agua hacia el acuífero, son los que se

ubican hacia el centro de la cuenca, en torno a la laguna de aguas claras y donde el relave alcanza una mayor profundidad.

6.1.3.1 Propiedades hidráulicas de las Unidades Hidrogeológicas

Escondida-BHP tiene registros de ensayos hidráulicos presentes en la cuenca Laguna Seca desde el año 1997, previos a TLS.

Los valores más antiguos de conductividad hidráulica y transmisividad en el área fueron realizados en pozos que se perforaron en la zona actualmente cubierta por los depósitos de relaves del TLS y son los únicos que tienen datos de aguas arriba del muro (Golder, 2018). Mientras que los datos más recientes, utilizados para este trabajo, corresponden a los ensayos (slug test, ensayos Lefranc y ensayos Lugeon) realizados dentro del proyecto sexto peralte (Golder, 2018), los cuales se ubican en los bordes del muro del TLS.

Tal y como se revisó en el capítulo de Ensayos Hidráulicos, el conjunto de los ensayos disponibles permite caracterizar la conductividad hidráulica de las distintas unidades geológicas en el área de estudio, las que, a su vez, son definidas, de acuerdo a sus características y comportamiento hidráulico, en unidades hidrogeológicas. En la tabla 11, se muestra un rango de los parámetros hidráulicos para cada unidad hidrogeológica de la cuenca Laguna Seca.

Tabla 11: Parámetros hidráulicos para las unidades hidrogeológicas (Golder, 2018).

Unidades Hidrogeológicas		Rango de Conductividad (m/s)		Sy(%)
		Máximo	Mínimo	
Unidad 1	Sedimentos no consolidados	1.0x10 ⁻⁴	5.0x10 ⁻⁶	5 - 15
Unidad 2	Areniscas con intercalaciones de lutita	1.0x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻¹⁰	0.5 - 12
Unidad 3	Lutitas	1.0x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻¹¹	0.5 - 12
Unidad 4	Formación El Profeta Inferior	1.0x10 ⁻⁷	1.0x10 ⁻¹¹	<1
Unidad 5	Formación Santa Ana	1.0x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻¹⁰	0.5 - 12
Unidad 6	Formación La Tabla	1.0x10 ⁻⁷	1.0x10 ⁻¹¹	<1
Unidad 7	Relaves	3.5x10 ⁻⁸	2.0x10 ⁻⁹	20 - 40

En el Gráfico 14, es posible observar de manera gráfica los rangos de conductividad hidráulica para cada unidad hidrogeológica.

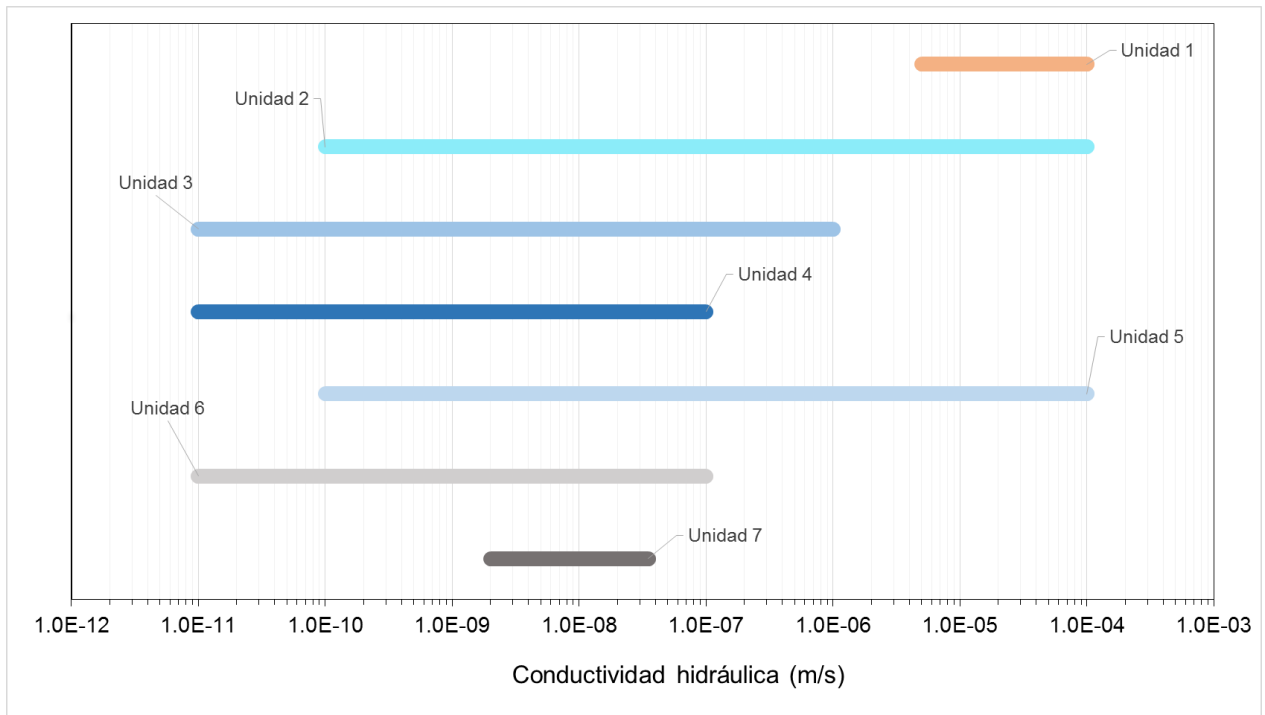


Gráfico 14: Rangos de conductividad hidráulica para cada UH (Golder, 2018).

Los rangos definidos para la conductividad hidráulica en las unidades de roca sedimentaria (unidades 2, 3, 4 y 5) muestran el alto grado de heterogeneidad que caracteriza estas unidades. El plegamiento, el nivel de fracturamiento y la presencia de fallas condicionan el valor de este parámetro.

En general, para las unidades antes mencionadas, los valores más altos de conductividad se asocian a sus capas más superficiales, donde se observan los mayores grados de fracturamiento. En profundidad, se espera valores de conductividad significativamente menores. De todas las unidades de roca, la Unidad 2 (Areniscas con intercalaciones de Lutitas) es la que presenta el mayor grado de heterogeneidad, según los resultados de los ensayos hidráulicos disponibles. En particular, en esta unidad es donde se han registrado los valores de conductividad más altos, lo que es consistente con el hecho de ser la unidad de roca más superficial. Se espera que las unidades 3 y 4 presenten los menores valores de conductividad que la Unidad 2, debido a su menor grado de fracturamiento. En algunos sectores de la Unidad 3 (Lutitas), específicamente en la zona cercana al contacto con la Unidad 2, podría presentar localmente un mayor fracturamiento y, por tanto, una mayor conductividad. Por este motivo, el límite superior definido para el valor de la conductividad en la Unidad 3 es mayor que el de la Unidad 4.

7. RESULTADOS

En los capítulos anteriores, se presentaron las principales variables que permiten caracterizar un acuífero y cómo estas variables influyen directamente al momento de identificar flujos preferenciales de agua en una cuenca endorreica.

Es por eso, que como resultados de esta memoria de título se presentan los modelos creados a partir de la aplicación de la metodología propuesta inicialmente.

7.1 IDENTIFICACIÓN DE FLUJOS SUPERFICIALES

Para identificar los flujos superficiales, se recomienda utilizar softwares de sistemas de información geográfica (SIG), para este trabajo se utilizaron ArcGIS, *GlobalMapper* y *Surfer*, cada uno de ellos entrega distintas funciones que permiten interactuar entre sí y crear un modelo de los flujos superficiales de la cuenca Laguna Seca.

Desde *GlobalMapper* se descarga el DEM, que permite modelar la topografía de la cuenca. Además, este software cuenta con una herramienta para identificar directamente la hidrología (red hídrica) del DEM descargado, para luego exportar los datos a ArcGIS.

En ArcGIS, se trabaja con las líneas de la red hídrica, las cuales pueden modificarse manualmente con ayuda de las imágenes satelitales del área de estudio, para obtener una mayor precisión de los desniveles topográficos que permiten la escorrentía superficial. Utilizando el DEM y la herramienta para crear puntos aleatorios dentro de la imagen, se calcula el valor z (altura topográfica), para luego exportar estos valores como una base de datos con puntos coordinados al *software Surfer*.

En *Surfer*, se importa la base de datos creada anteriormente, para crear una superficie de contorno con la información de la topografía de la cuenca (mapa de isolíneas) y, además, es posible agregar como mapa base el polígono que representa los límites de la cuenca hidrológica, el polígono que muestra el contorno del tranque de relaves y las polilíneas de la red hídrica. La figura 29 es el resultado del modelo 2D realizado con *Surfer*.

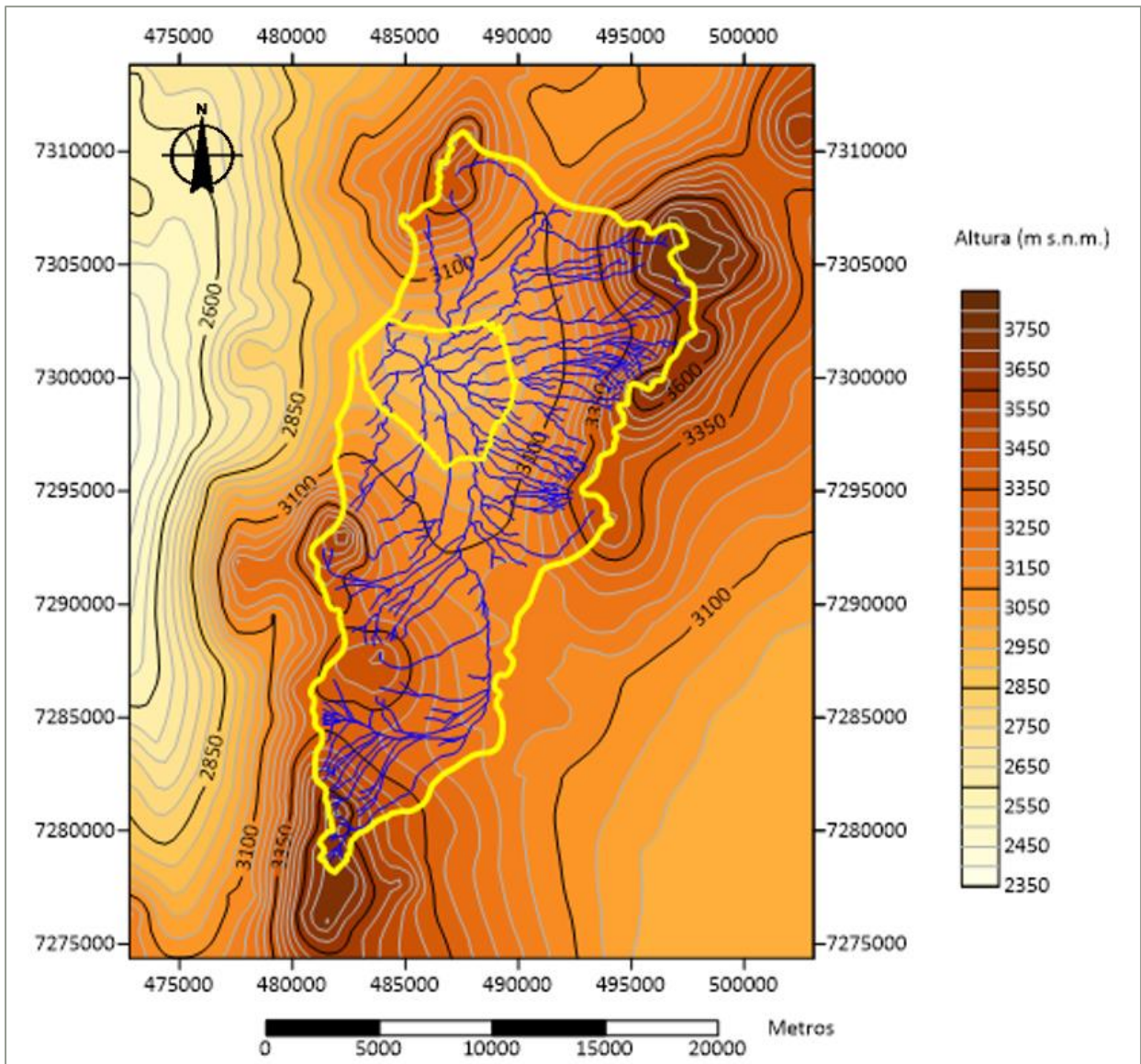


Figura 29: Modelo 2D de flujos superficiales.

Una vez que se tiene creado el mapa de contorno con los valores x-y-z de la base de datos, se puede crear un mapa 3D utilizando el archivo *grd.*, creado por el mismo software al momento de hacer el mapa de isolíneas topográficas, se utiliza el comando 3D *wireframe*, para obtener la superficie topográfica en formato tridimensional. En último lugar, se unen los dos mapas (contorno y 3D *wireframe*) para obtener como resultado el modelo 3D de flujos superficiales de agua (Figura 30).

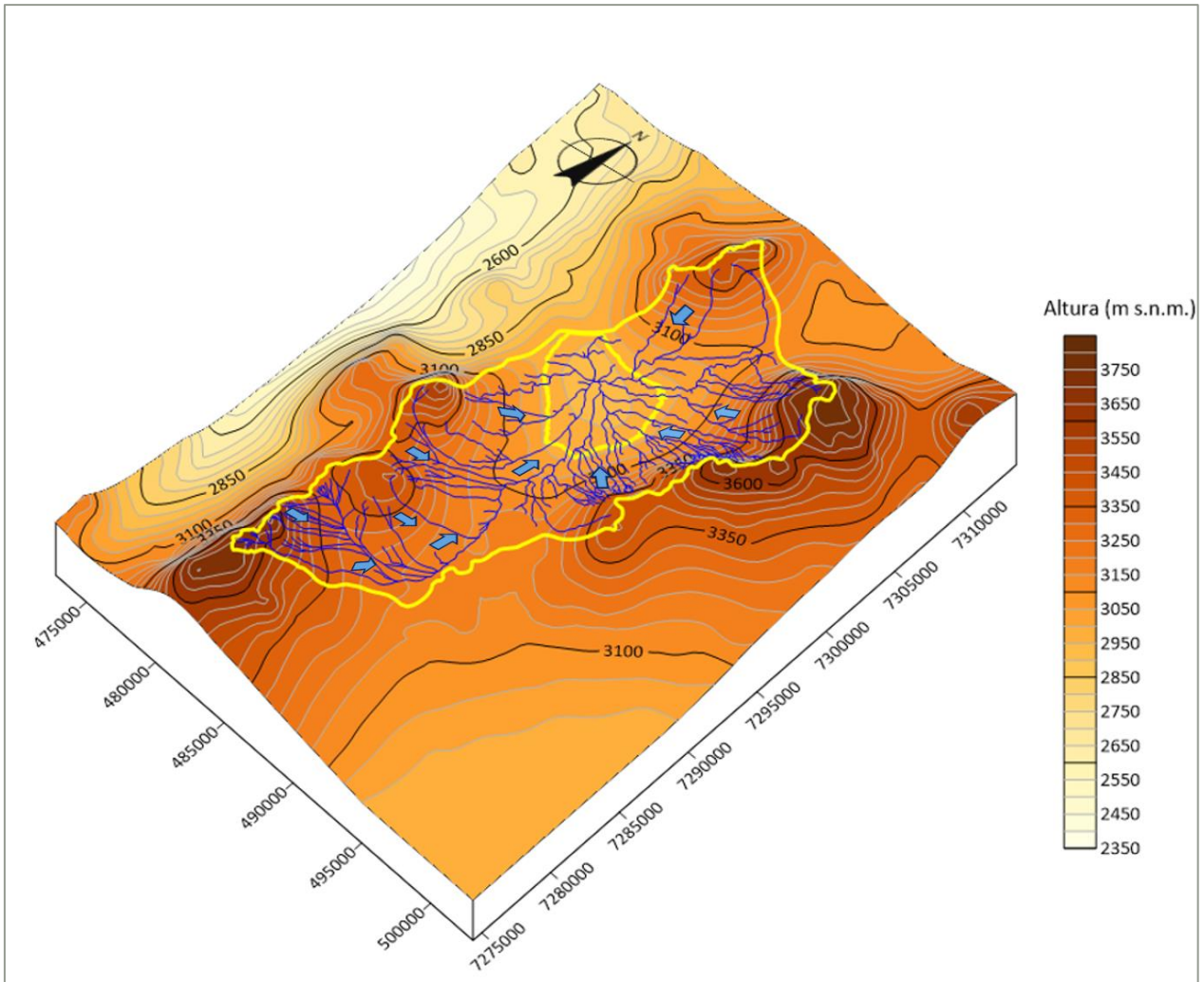


Figura 30: Modelo 3D para flujos superficiales.

En el Anexo 3, se detalla paso a paso el procedimiento para realizar mapas de isolíneas con *Surfer*, utilizando como ejemplo los datos de la superficie topográfica.

Para concluir, los flujos preferenciales de agua superficial están definidos en base a la red hidrográfica y la topografía del área de estudio. Sin embargo, es necesario mencionar que, al tratarse de una zona de clima desértico con escasas precipitaciones, la red hidrográfica corresponde a una red hidrográfica efímera, es decir, no presentan flujos de agua permanente, sino que estas podrían transportar agua en periodos de lluvia o nieve.

7.2 IDENTIFICACIÓN DE FLUJOS SUBTERRÁNEOS

Para los flujos subterráneos de LS, se propone crear un modelo de la piezometría y realizar un análisis hidroquímico, que permita identificar el sentido del movimiento de diferentes iones transportados en el agua; y complementar esta información con métodos geofísicos.

7.2.1 Piezometría

La piezometría corresponde a curvas de igual altura piezométrica y a estas curvas se les llama isopiezas, hidroisoipsas o líneas isopiezométricas. Para aguas subterráneas, una red de flujo es la representación gráfica de dos familias de líneas: líneas de flujo, que equivalen a las trayectorias que sigue el agua y las líneas equipotenciales, que corresponden a líneas de puntos de igual energía. Al representar estas familias de líneas en un mapa, las líneas equipotenciales son proporcionales a las isopiezas, mientras que las líneas de flujo son perpendiculares a estas últimas.

Por lo tanto, los análisis de niveles de agua y la caracterización de la superficie piezométrica entregan información fundamental para comprender el comportamiento hidráulico de un acuífero y permiten determinar distribución, gradientes, dirección y sentido del flujo de agua.

Para la cuenca Laguna Seca, se cuenta con información de niveles de agua previos al inicio de la operación de TLS hasta la fecha, con esta información se creó una base de datos con niveles de agua monitoreados.

La metodología utilizada para crear la superficie piezométrica consiste en tener una base de datos (BD) con los puntos coordinados de los pozos en los que se miden los niveles de agua, se exporta esta BD al software ArcGIS y una vez que los puntos se encuentran georreferenciados, se abre *ArcToolbox* para utilizar la herramienta interpolación con *kriging* (*ArcToolbox >> Spatial Analyst Tools >> Interpolation >> Kriging*), la cual permite crear una superficie raster a partir de los puntos coordinados con sus respectivos valores de niveles de agua. Dentro de las configuraciones del raster es posible ajustarlo a la forma de la cuenca y asignar una rampa de colores representativa para los cambios de los niveles de agua. En la Figura 31 se muestra la piezometría realizada en el software ArcGIS, a partir de los datos más recientes de niveles de agua, y las flechas de color celeste muestran las direcciones y sentido de agua.

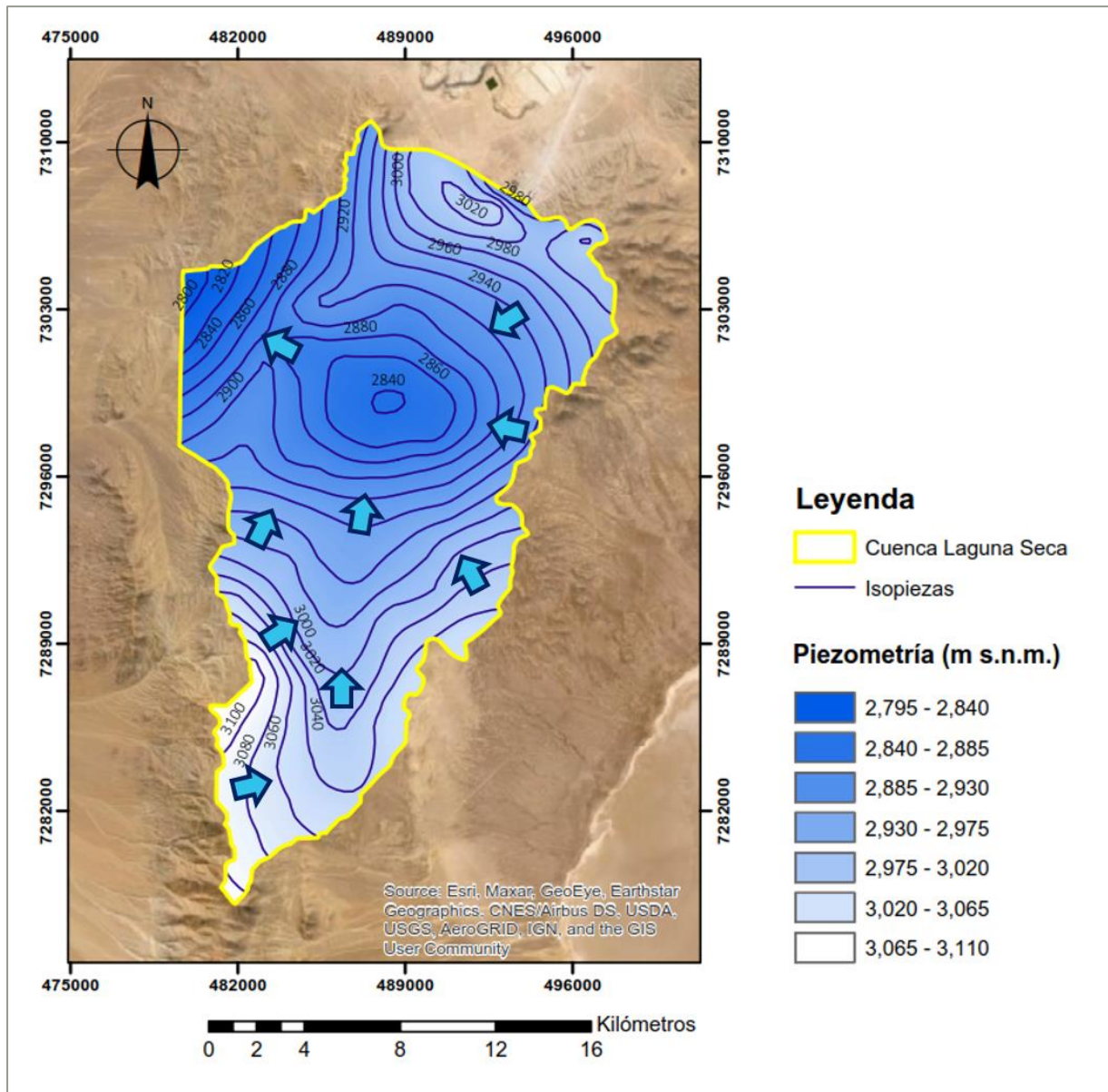


Figura 31: Piezometría diseñada con ArcGIS.

Al igual que con los flujos superficiales, se trabajó con el software *Surfer* (versión 18) para modelar la superficie piezométrica en 2D y 3D (Figura 32 y 33, respectivamente). Se utilizaron los mismos datos que en la piezometría procesada en ArcGIS y el mismo método de interpolación (*kriging*), para ver la distribución de los niveles de agua en la cuenca.

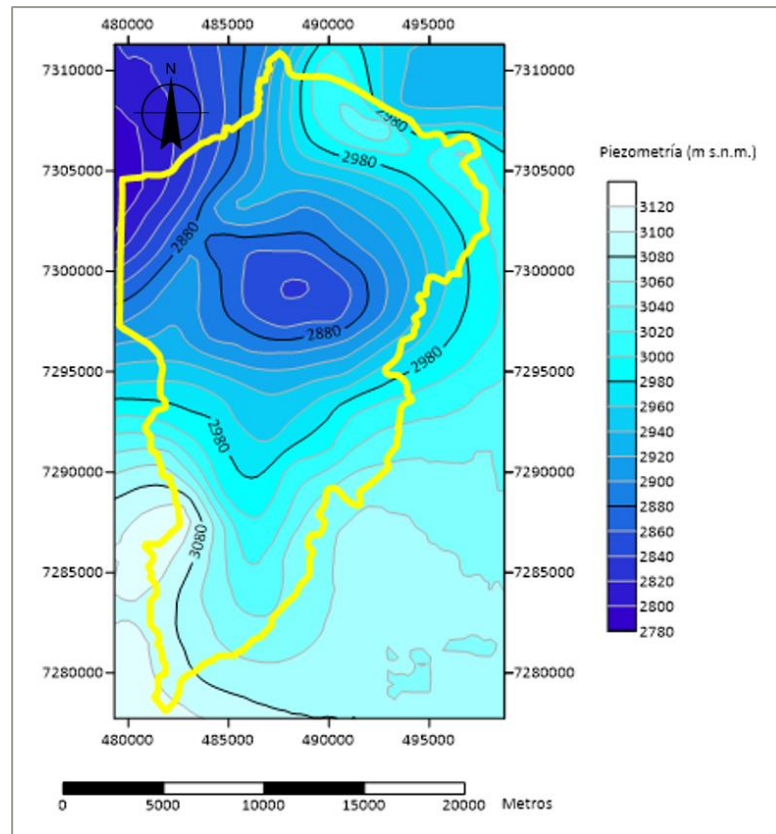


Figura 32: Piezometría 2D realizada en Surfer.

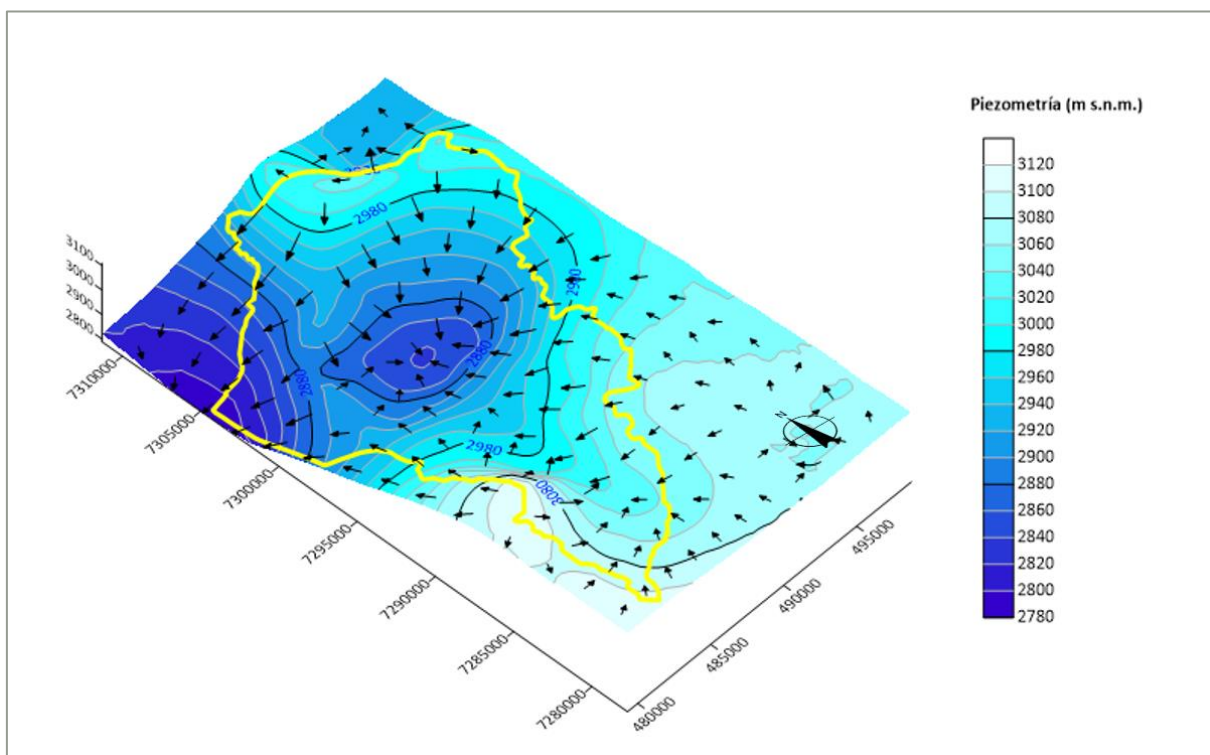


Figura 33: Piezometría 3D realizada en Surfer.

Adicionalmente, se realizó un modelo para mostrar la relación entre la topografía y la piezometría de la zona en estudio (Figura 34)

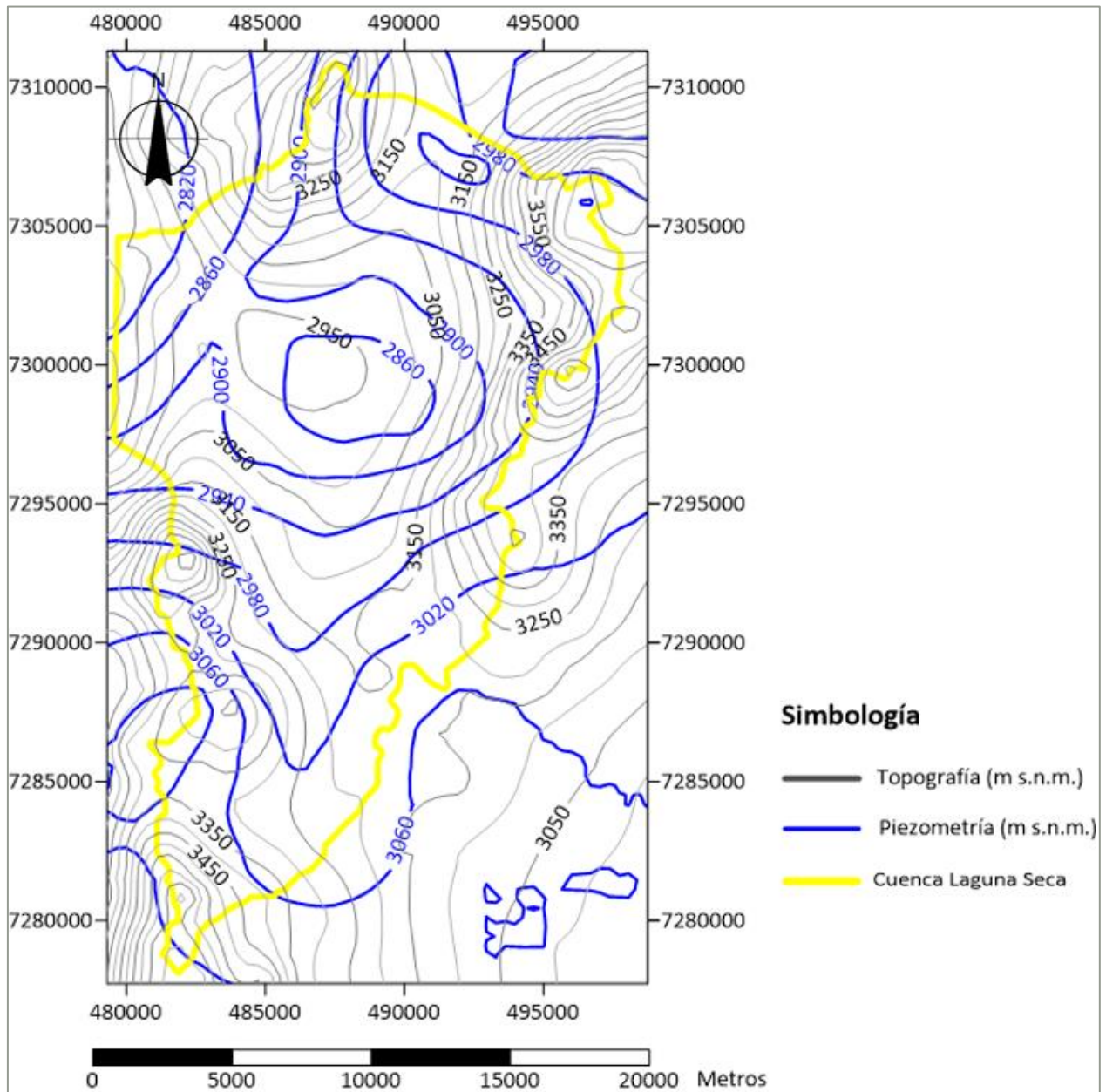


Figura 34: Modelo 2D piezometría más topografía.

El *software Visual Modflow* tiene una herramienta que permite observar de forma tridimensional y en conjunto las superficies topográficas y piezométricas de la cuenca (Figura 35), obteniendo el siguiente modelo:

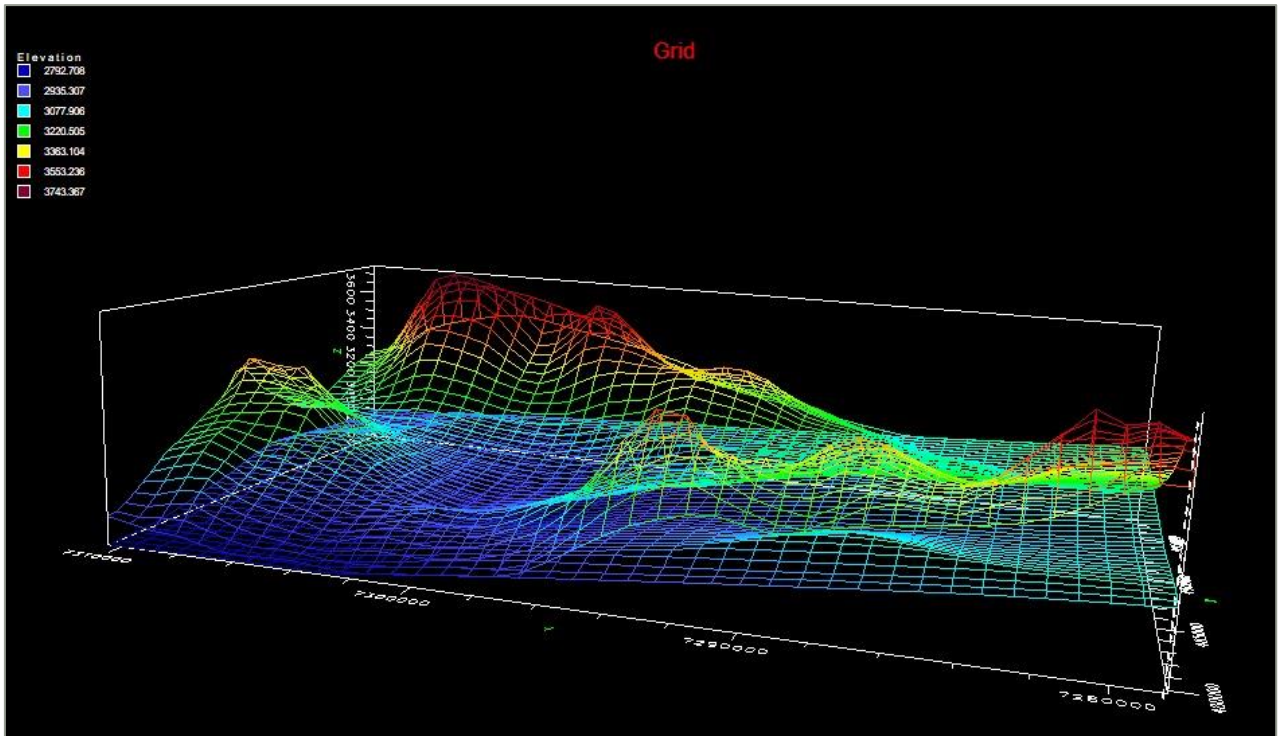


Figura 35. Visualizador de superficies en Visual Modflow

De la Figura 35, es posible observar que la superficie piezométrica en general presenta una coloración azul, mientras que la superficie topográfica presenta variación de coloración desde el azul (colores de menor altura topográfica) a rojo (colores de mayor altura). De lo anterior es posible mencionar que las zonas con colores azules (topografía) corresponden a zonas de la cuenca donde el nivel piezométrico está cercano a la superficie.

De los modelos realizados utilizando ArcGIS, *Surfer* y *VisualModflow*, es posible observar que los tres modelos entregan información muy similar, pero con distinta definición. De manera general, los tres modelos representan un flujo radial hacia el centro de la cuenca, donde existe una zona de recarga desde las zonas altas de la cuenca, llegando hasta la laguna del tranque de relave, lugar en que visualmente ambas superficies pueden observarse más juntas. Finalmente, la descarga ocurre en el sector oeste de la cuenca, donde el flujo de agua subterránea tiene una dirección este-oeste, similar al flujo natural superficial que debería circular por la quebrada.

7.2.2 Análisis Hidroquímico

Según SEA (2012), para modelos de flujo, el estudio hidrogeoquímico consiste en una valiosa información complementaria, ya que permite comprender con mayor certeza las dinámicas de los flujos y su interacción. En modelos de transporte este estudio es indispensable, puesto que forma parte de la línea de base de calidad del agua y entrega información acerca de procesos químicos, propiedades y otros aspectos relacionados a la dinámica de la calidad del agua.

En el capítulo de hidrogeoquímica se mencionó la importancia que juega el ion cloruro en la cuenca Laguna Seca y como sus concentraciones pueden estar asociadas a distintos orígenes de las aguas. Según Singhal & Gupta (2010) es posible crear mapas de isocloro, que corresponden a isolíneas que representan la distribución del ion cloruro, las cuales son útiles para determinar la dirección del flujo de agua subterránea, ya que normalmente la concentración de cloruro aumenta en la dirección del flujo.

En la Figura 36, se presenta un mapa de isolíneas de la distribución del ion Cl^- (mg/L) en el TLS y sus alrededores, creado con el software *Surfer* v18. Para realizar este mapa se utilizaron los datos de concentraciones que fueron presentados en la Tabla 7 del capítulo de Hidrogeoquímica.

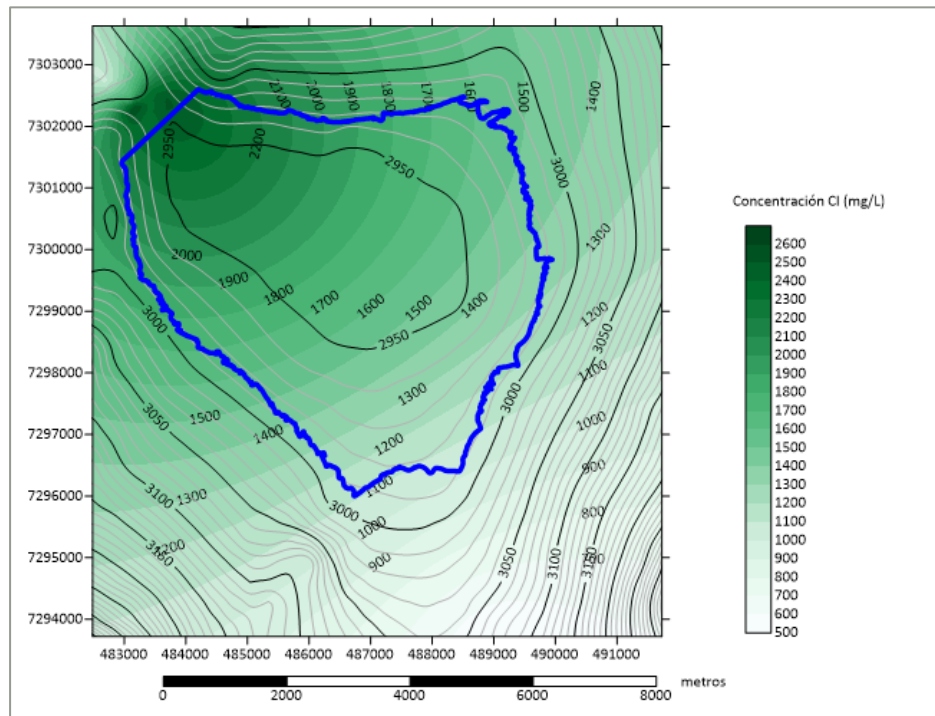


Figura 36: Mapa de isoconcentración de cloruro.

Del mapa, es posible identificar una alta concentración de ion cloruro en el sector noroeste de TLS, específicamente, en la zona en que se encuentra ubicada la cortina de pozos de bombeo. Además, según lo señalado por Singhal & Gupta (2010) es posible interpretar que las líneas de flujo de agua tienen una dirección perpendicular a las líneas de isoconcentración del ion cloruro y un sentido hacia donde aumenta dicha concentración. También, es importante señalar que al noreste de la cortina de pozos de bombeo la concentración de cloruro disminuye drásticamente, por lo que las aguas bajo la cortina de pozos no se verían influenciadas por las altas concentraciones de Cl^- que aportan las aguas de relaves.

En el Gráfico 15 se muestra en un perfil NW-SE, que representa las concentraciones de Cl^- (mg/L) mencionadas en la figura anterior.

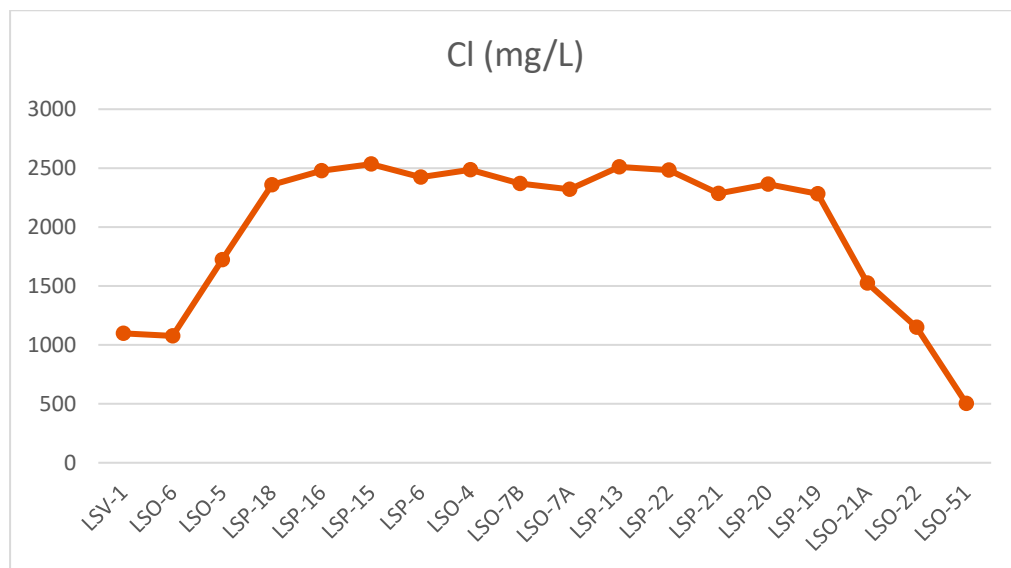


Gráfico 15: Concentraciones de Cl^- ordenadas en dirección NW-SE.

Los pozos LSO-51, LSO-22 y LSO-21A son los que se encuentran ubicados al este y corresponderían a los pozos con agua natural del acuífero (bajas concentraciones de Cl^-), mientras que los puntos LSO-6 y LSV-1 corresponden a muestras ubicadas al oeste del muro del tranque de relaves y presentan concentraciones similares al pozo LSO-22. Por lo tanto, tal y como muestra el gráfico, las altas concentraciones de cloruro se encuentran localizadas en la zona aguas abajo del muro del tranque de relaves, específicamente en los pozos de bombeo. Además, es posible señalar que, gracias a los pozos de la cortina hidráulica (pozos de bombeo), es que se pueden mantener controladas las concentraciones de cloruro aguas abajo de la cortina hidráulica.

Evaluando temporalmente el comportamiento del ion cloruro, se sigue tomando como ejemplo el primer trimestre del año 2020. El Gráfico 16, presenta cuatro muestras de agua, LSP-6 y LSP-18, correspondientes a dos pozos de la cortina hidráulica; LSO-51, pozo que representa a las muestras de agua del acuífero natural; y la fase líquida de relave.

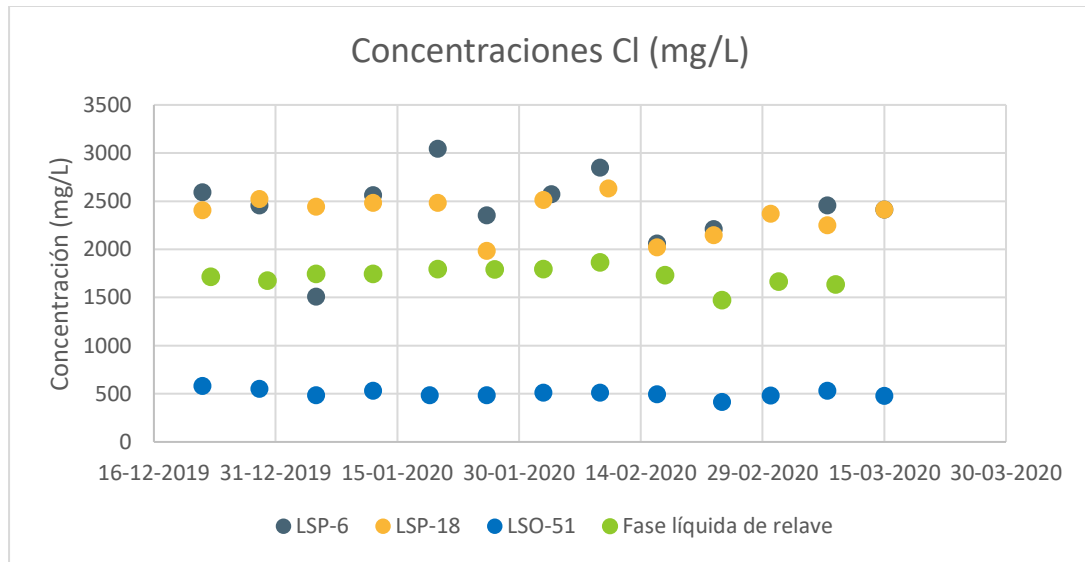


Gráfico 16: Variaciones de concentraciones de Cl⁻ para el primer trimestre 2020.

Del gráfico es posible observar que las concentraciones del pozo LSO-51 y de la fase líquida de relave se mantienen con mínimas variaciones durante los 3 meses, mientras que los pozos LSP-6 y LSP-18 presentan variaciones de concentración más notorias. Hay que destacar que las concentraciones de cloruro en la fase líquida de relave son menores que las concentraciones en los pozos de bombeo.

También, se realiza un mapa de isoconcentraciones de NO_3^- (mg/L) (Figura 37), ya que, como se mencionó en el capítulo de hidrogeoquímica, es posible utilizar este ion como un trazador complementario al ion cloruro y con el mapa es posible corroborar que el NO_3^- tiene un comportamiento similar a Cl^- en cuanto a su distribución espacial.

Adicionalmente y considerando que la cuenca Laguna Seca es el sector que recibe los relaves del yacimiento Escondida, se presenta un mapa de isolíneas de concentración de Cu (Figura 38) para evaluar la influencia de los relaves, en general, las concentraciones de cobre presentan variaciones mínimas y al igual que los mapas anteriores, los valores máximos se encuentran en la zona que está ubicada la cortina de pozos de bombeo, alcanzando valores de hasta 0.08 mg/L.

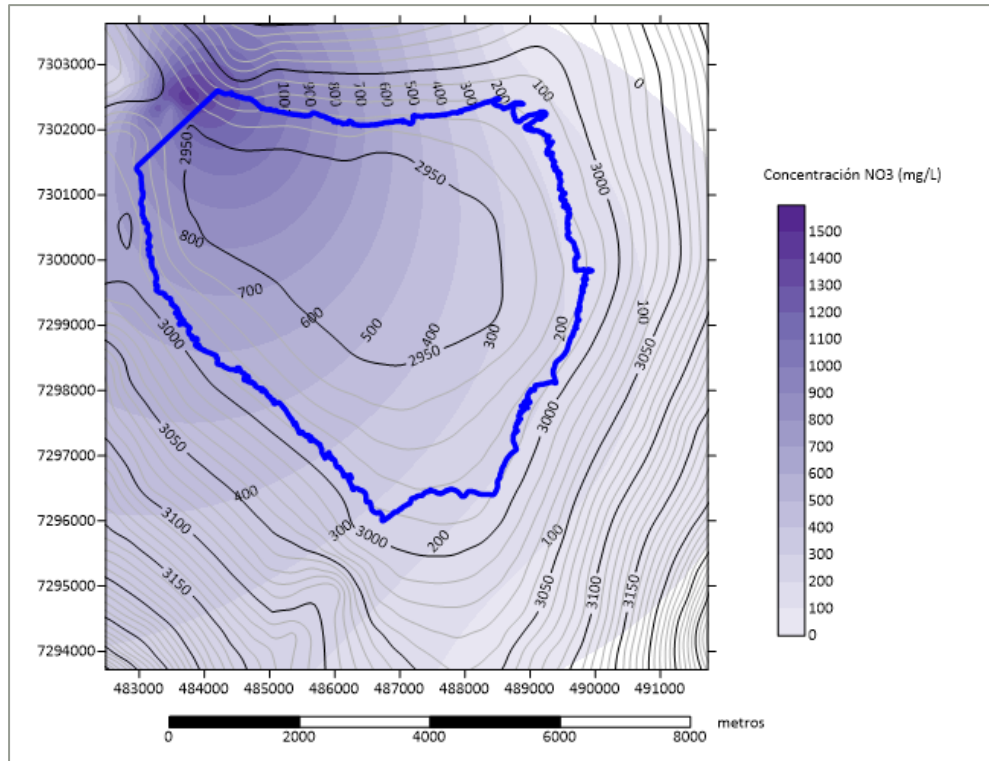


Figura 37: Mapa de isoconcentración de nitrato.

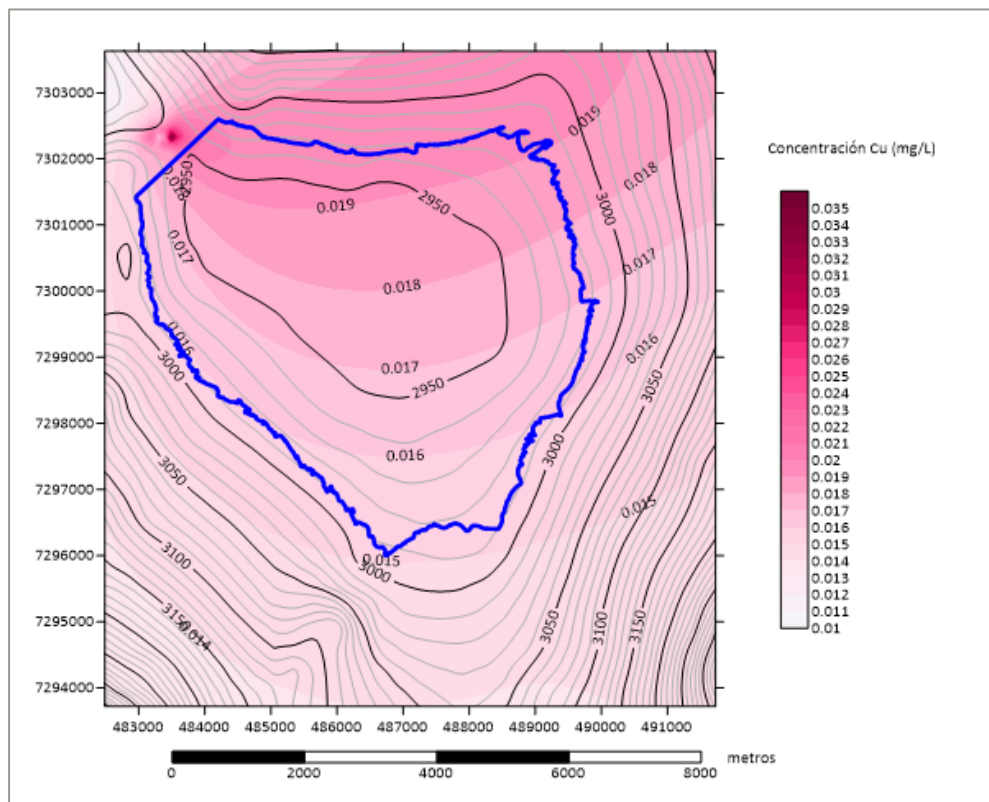


Figura 38: Mapa de isoconcentración de cobre.

En definitiva, a través de los análisis químicos realizados en la cuenca Laguna Seca, es posible señalar que los relaves depositados en el TLS, traen consigo una gran cantidad de cloruro y nitrato, los cuales pueden causar variaciones composicionales en algunos pozos cercanos al tranque. Sin embargo, a través de los mapas de isoconcentraciones, es posible señalar que los flujos de agua influenciados por los relaves están siendo capturados por los pozos de la cortina de bombeo y que las aguas bajo la cortina de pozos siguen presentando composiciones químicas similares a las del acuífero natural.

7.2.3 Geofísica

Al igual que los análisis hidrogeoquímicos, los métodos geofísicos sirven para complementar un estudio de flujos de agua. Un ejemplo de esto es la Figura 39, en la cual se representa de manera aproximada la ubicación de tres perfiles de tomografía eléctrica y como estos se relacionan entre sí. Los sectores de baja resistividad (azul) corresponden a zonas de mayor conductividad hidráulica, mientras que los sectores con alta resistividad (rojo) podrían interpretarse como zonas con ausencia de humedad.

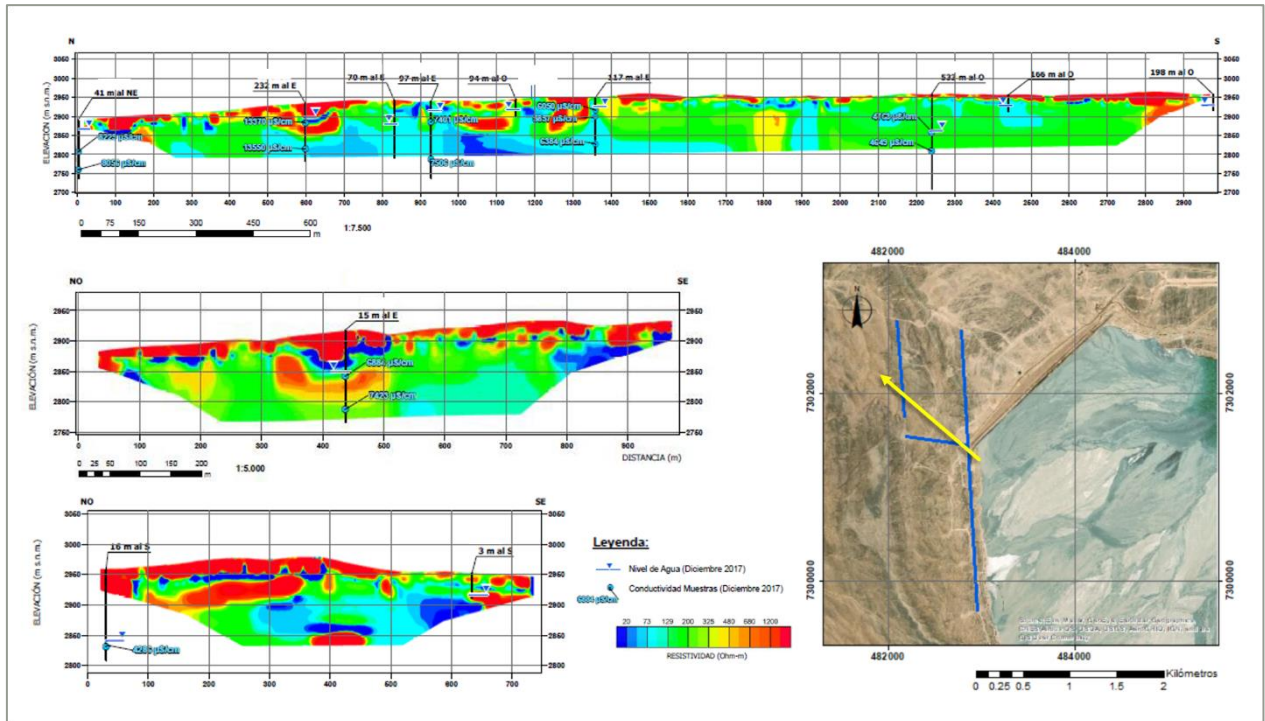


Figura 39: Integración de perfiles de tomografía eléctrica (Golder, 2018) para determinar flujo de agua.

Las tres grandes zonas azules de los perfiles geofísicos (Figura 39) podrían corresponder a zonas saturadas en agua, que en conjunto pueden indicar la dirección del flujo de agua subterránea, como muestra la flecha amarilla del mapa. Sin embargo, dentro de los análisis realizados, al contrastar la información geofísica y los niveles piezométricos, es posible observar que existen zonas saturadas en agua que presentan una alta resistividad. Otro ejemplo, es el perfil de resistividad de la Figura 40, el cual se encuentra ubicado en dirección NO-SE en la quebrada aguas abajo del muro de TLS.

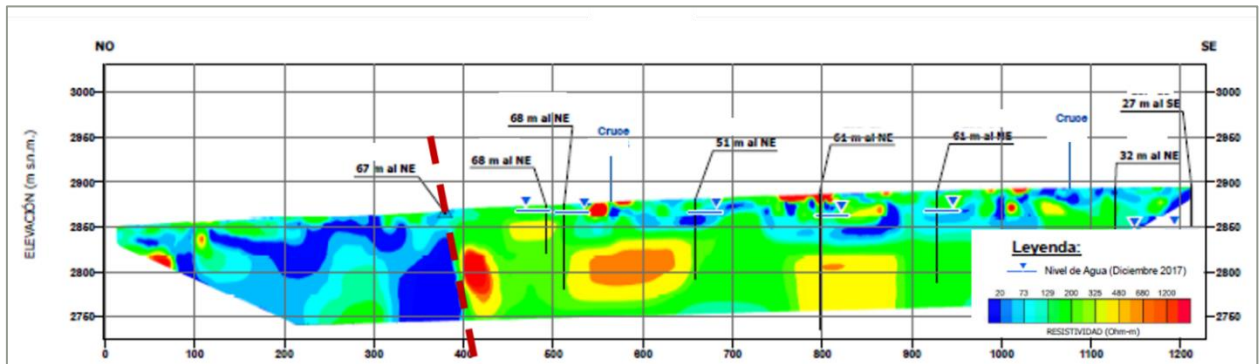


Figura 40: Perfil geofísico con orientación NO-SE sector aguas abajo del muro TLS (Golder, 2018).

Es posible observar una disminución abrupta de la resistividad de este a oeste (marcado con línea segmentada de color rojo), lo que se traduce en un aumento de la conductividad hidráulica. Este cambio podría deberse a un cambio en la litología, presencia de una falla o contacto de litologías influenciado por una estructura. Lo cual puede complementarse o verificarse con la información obtenida en terreno o sondajes. Ejemplo de lo anterior es lo representado en la Figura 41, que muestra un perfil del modelo geológico realizado por Golder (2018) en una sección casi paralela a la Figura 40.

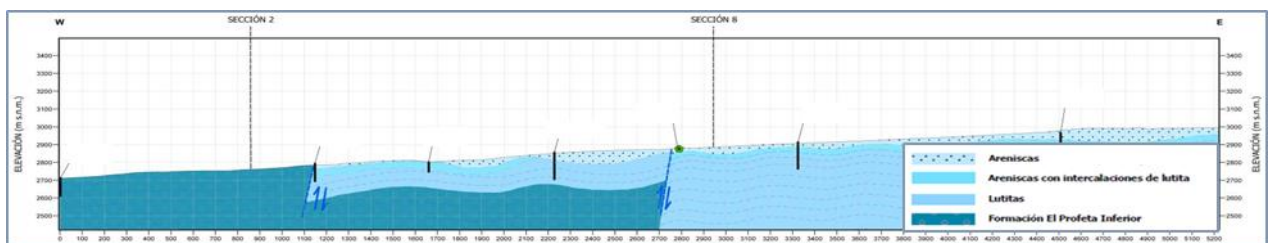


Figura 41: Sección del modelo geológico (Golder, 2018).

Si bien este método puede ayudar a identificar flujos de agua, está sujeto a variables que interfieren en la interpretación, ya que, la resistividad de distintas rocas o sedimentos puede verse afectada por su composición e incluso el grado de compactación. Además, hay que considerar que el área de

estudio se encuentra afectada por el Sistema de Fallas de Domeyko, un sistema estructural que permite la mineralización de pórfidos de cobre, por lo que los valores de resistividad podrían verse afectados por la presencia de minerales metálicos.

8. PROPUESTA RED DE MONITOREO

El monitoreo de la calidad del agua es una herramienta fundamental en el manejo de los recursos de aguas dulces. La adecuada ubicación red de monitoreo aporta datos para valorar el estado y la dinámica de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

El objetivo de la creación de una red de monitoreo es aportar datos de referencia para estimar la dimensión y las posibles causas de las variaciones espacio-temporales de la calidad del agua, variaciones en el comportamiento hidráulico de una cuenca; e incluso, establecer una red o un programa de monitoreo para los distintos flujos de agua en zonas de actividades minero-metalúrgicas.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), con aportes de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y de la UNESCO, publicaron en 1996, un libro llamado Water Quality Monitoring (Bartram & Ballance, 1996). Este libro ofrece los fundamentos para diseñar e implementar programas de monitoreo de la calidad del agua y estudios sobre el impacto que las actividades humanas ejercen en los cuerpos de agua. Además, entrega información detallada acerca de la creación de un protocolo general para el diseño e implementación de un programa de monitoreo en aguas superficiales y subterráneas; detalles sobre métodos analíticos y de muestreo; orientación para el análisis y presentación de datos, entre otros. Este libro se utilizará como guía para trabajar en este capítulo.

La cuenca Laguna Seca cuenta con un monitoreo constante de los pozos que rodean al tranque de relaves del mismo nombre. El objetivo de proponer una red de monitoreo es extender el control de calidad actual a toda la cuenca.

En primer lugar, es importante considerar la información con la que ya se cuenta, para ubicar los sectores en los que falta cantidad y calidad de información. Luego, proponer ubicación de pozos nuevos para cubrir una mayor área de monitoreo y tener un mejor control de calidad de las aguas de la cuenca.

Esta propuesta, se crea como un complemento a la actual red de monitoreo que presenta la cuenca Laguna Seca. Por lo tanto, se proponen puntos que puedan ayudar a cubrir una mayor extensión y dar una mayor precisión a los parámetros físico-químicos que son utilizados para caracterizar el

funcionamiento y comportamiento hidráulico de la cuenca. En la Figura 42, se presentan los puntos que se proponen para un monitoreo hidroquímico y niveles de agua.

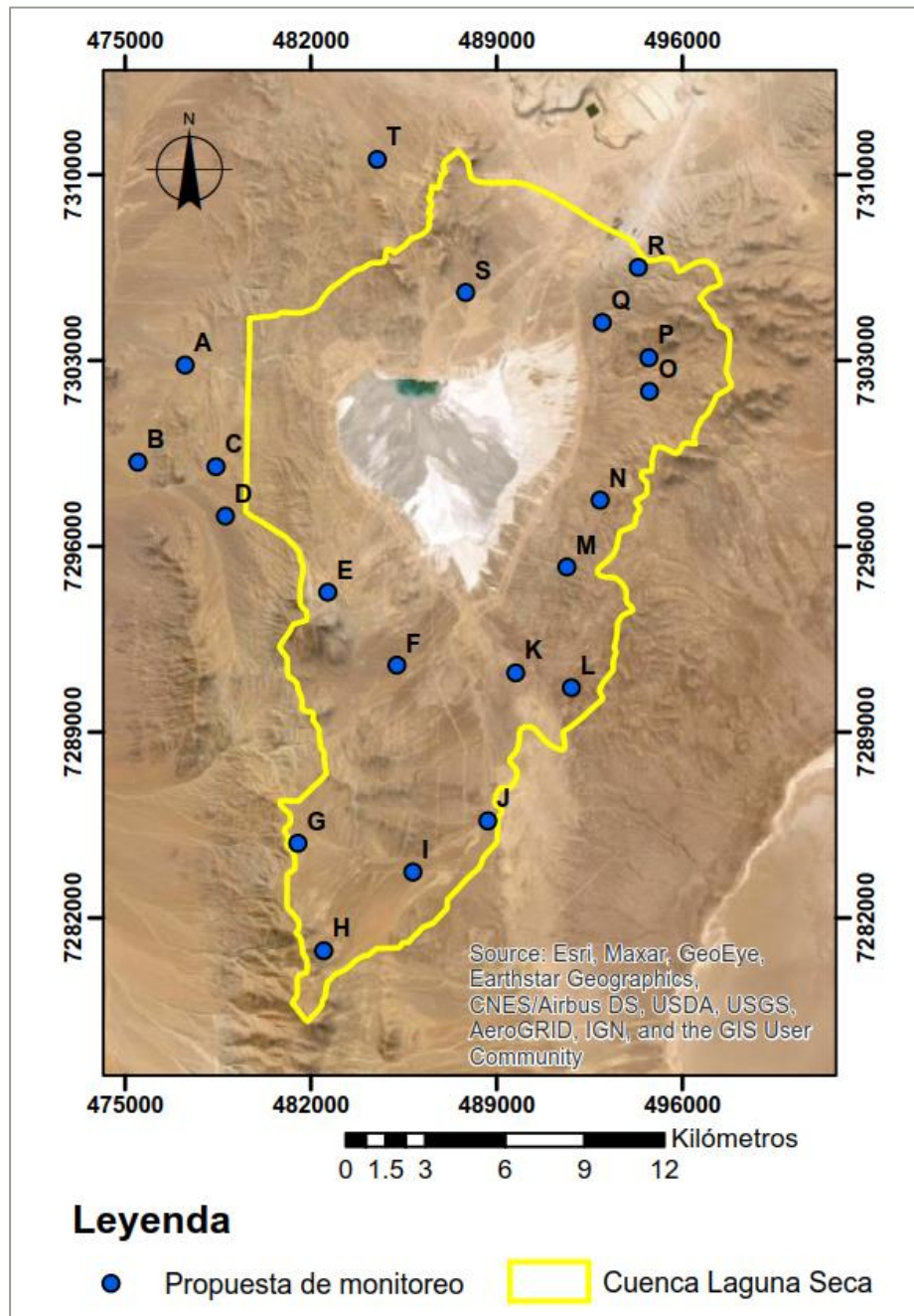


Figura 42: Ubicación de pozos que se incluyen en la propuesta de monitoreo.

En la Tabla 12 se muestran detalladamente los 20 puntos que se proponen para ser monitoreados, se explica el porqué de la propuesta, el tipo de monitoreo que se esperarías tener en ellos y la frecuencia con la que se deberían registrar los parámetros físico-químicos a analizar.

Tabla 12: Propuesta de monitoreo.

Puntos	Objetivo	Tipo de Monitoreo	Frecuencia de monitoreo
A	Se ubica un pozo en esta zona para complementar el actual monitoreo que presenta la quebrada que se encuentra inmediatamente bajo el muro del TLS. Con los datos actuales se observan variaciones notorias de los niveles piezométricos, este punto ayudaría a tener mayor información en la zona de descarga de la cuenca.	Hidroquímico - Piezometría	Mensual
B,C,D	Se propone monitorear estos puntos por su ubicación, ya que, se encuentran en una quebrada cercana a la zona de descarga de la cuenca y servirían para la caracterización química y piezométrica de esta área.	Hidroquímico - Piezometría - Isótopos	Trimestral
E,F, I, J, K, L, M, N, S, T	Se proponen estos puntos para ayudar a caracterizar el comportamiento de las aguas naturales del acuífero y ayudar a definir la interacción con las cuencas aledañas.	Hidroquímico - Isótopos	Trimestral
G, H, P, O	Estos puntos se eligen porque en estas zonas se encuentran rocas ígneas, por lo tanto, evaluar el comportamiento de agua en estas rocas, puede ayudar a caracterizar los flujos de agua en la zona sur y en la zona noreste de la cuenca.	Piezometría	Semestral
Q, R	Se propone monitorear estos puntos, ya que esta zona se ubica al sur de una falla geológica. Se tiene abundante monitoreo al norte de esta falla, por lo tanto, ubicar pozos en esta zona serviría para evaluar si existen diferencias en el comportamiento y calidad de las aguas al sur de la falla.	Hidroquímico - Piezometría	Mensual

Para los monitoreos hidroquímicos y de isótopos es necesario tomar periódicamente muestras de agua de los pozos en los que se señala este análisis, para luego enviar estas muestras a ser analizadas a un laboratorio.

Para las mediciones de piezometría, es necesario habilitar correctamente el pozo y utilizar un piezómetro, de modo que pueda realizarse un registro histórico de los niveles de agua subterráneo.

9. CONCLUSIÓN

La cuenca Laguna Seca, corresponde a una cuenca endorreica ubicada en un sector pre-altiplánico, al sur del yacimiento Escondida. Esta cuenca tiene la particularidad de contener al tranque de relaves de Escondida, siendo este la principal entrada de agua a la cuenca. En este trabajo se realiza un detallado análisis de las variables que componen al modelo hidrogeológico conceptual, con la finalidad de establecer una metodología para identificar flujos preferenciales de agua en la cuenca.

La identificación de flujos preferenciales de agua de la cuenca Laguna Seca, conlleva un detallado estudio y análisis de seis pilares fundamentales: Geología (y Geomorfología), Geología estructural, Hidrología, Hidrogeoquímica, Ensayos de bombeo y Geofísica. Para efectos de este trabajo se propone identificar los flujos preferenciales de agua mediante el análisis de Hidrología, Piezometría, Hidroquímica y Geofísica; siempre considerando la geología del área de estudio al momento de hacer las interpretaciones fundamentales.

La cuenca Laguna Seca, se encuentra dominada por el Sistema de Fallas de Domeyko (SFD), formada en respuesta al evento compresivo ocurrido durante el Eoceno en la Fase Tectónica Incaica. En la cuenca y sus alrededores se pueden encontrar rocas desde el paleozoico al reciente, que se encuentran afectadas por fallas inversas de alto ángulo y las unidades más antiguas presentan un intenso plegamiento. Por lo tanto, en este trabajo se presentó una detallada descripción de las litologías, estructuras y geomorfología, regional y local.

A partir de las unidades geológicas presentes en el área de estudio, se definen las siete unidades hidrogeológicas que componen al modelo hidrogeológico conceptual. Las cuales se caracterizan principalmente en base a las litologías, tamaño (extensión y espesor) y distribución de las unidades de roca o sedimento, considerando la transmisividad, conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento de cada unidad.

A modo general, en este trabajo se logró implementar la metodología propuesta inicialmente para la identificación de los flujos preferenciales de la cuenca y gracias al procedimiento realizado, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

Para identificar los flujos superficiales de la cuenca se utilizó la red hidrográfica, la cual corresponde a una red de drenaje efímera dadas las escasas precipitaciones pluviales y nivales. Sin

embargo, cuando se tienen episodios de lluvia o nieve, la cuenca presenta un flujo preferencialmente radial que culmina en el tranque de relave TLS.

En cuanto a los flujos subterráneos, se utilizó la superficie piezométrica creada a partir de los niveles de agua registrados en los distintos pozos que rodean al TLS. La piezometría creada tiene un comportamiento similar a la red hidrográfica superficial, sin embargo, los flujos de agua no terminan en el tranque de relaves, si no que tienen una descarga por el sector oeste de la cuenca, específicamente por el sector en que se encuentra la quebrada que está bajo el muro del tranque. Si bien la piezometría entrega una tendencia de los flujos de agua, en este trabajo se propone validar esta información mediante análisis hidroquímicos y geofísicos.

Dada la presencia de un tranque de relaves en la cuenca, es necesario realizar monitoreos hidrogeoquímicos constantemente y llevar un registro histórico de la calidad de las aguas. Para este trabajo fue fundamental trabajar con datos de hidroquímica, ya que, de acuerdo a la identificación de iones específicos se pueden establecer tendencias de flujos de agua. Se utilizaron los datos de enero a marzo del año 2020 para ejemplificar la metodología propuesta, estos muestran concentraciones distintas de elementos de acuerdo a la ubicación de los pozos que son monitoreados, permitiendo establecer diferencias representativas entre las aguas naturales del acuífero y la fase líquida de relave.

Para identificar flujos de agua mediante hidroquímica, se realizan mapas de isoconcentración de los iones cloruro y nitrato, siendo estos los iones representativos para los aportes de agua desde el TLS. Es importante mencionar que los flujos de agua entregados por el TLS circulan desde los sectores periféricos del tranque hasta los pozos de bombeo de la cortina hidráulica, por lo que estos flujos no pasan hacia el sector oeste de la cortina, es decir, las aguas que son aportadas por el tranque de relaves, están siendo capturadas por estos pozos, impidiendo que las aguas ricas en cloruro y nitrato fluyan hacia el sector de descarga natural de la cuenca.

En cuanto a la geofísica, se presentan como ejemplo perfiles de tomografía eléctrica, los cuales permiten identificar en profundidad cuales son las zonas de mayor conductividad eléctrica. Sin embargo, este método de análisis presenta desventajas que podrían interferir en la correcta interpretación de los datos. Las tomografías eléctricas muestran las resistividades eléctricas de las rocas o sedimentos, por lo que si existen rocas o minerales metálicos que naturalmente presentan

baja resistividad, estos podrían confundirse con zonas de alta conductividad hidráulica. Por lo tanto, este trabajo concluye que este método debe ser utilizado para identificar fallas o cambios de litología que sean respaldados mediante la descripción de sondajes; y para identificar zonas saturadas en agua, que sean respaldadas mediante el uso de piezómetros.

Escondida BHP, tiene una sólida red de monitoreo en la cuenca laguna seca y entorno al tranque de relave. Aun así, el objetivo final de este trabajo es proponer una red complementaria de monitoreo que contemple las zonas preferenciales de flujos de agua y que además refuerce la actual red de monitoreo. Para esto se consideraron todos los factores que influyen en la cuenca, para determinar la ubicación de los pozos mencionados en la propuesta. La finalidad es que estos pozos puedan entregar información que permitan caracterizar la cuenca en su totalidad y ayudar en el monitoreo de calidad de las aguas.

10. RECOMENDACIONES

De acuerdo con toda la información analizada en esta memoria de título, se recomienda lo siguiente:

- Extender el área de monitoreo, tanto dentro como en los alrededores de la cuenca Laguna Seca, específicamente en el límite oeste y los sectores sur y suroeste. Este punto tiene estrecha relación con la propuesta de monitoreo ya realizada.
- Se recomienda realizar campañas de trazadores ya que son una herramienta valiosa para determinar las características del flujo de agua, ya sea, en identificar dirección y sentido del flujo de agua subterránea, tasas de flujo, propiedades de transporte de solutos e incluso, identificar los límites de la cuenca.
- También se recomienda, crear una base de datos con la caracterización química de las aguas que tengan estrecha relación con la cuenca Laguna Seca. Esto incluiría, tomar muestras de precipitaciones, aguas del acuífero natural, aguas aportadas por el TLS, agua de mar proveniente de la desaladora de Puerto Coloso (que son ocupadas en los procesos de producción de cobre) y aguas de las cuencas colindantes a Laguna Seca. Esto permitirá identificar desde un punto de vista químico las distintas aguas que interactúan en la cuenca.
- Se recomienda actualizar constantemente los modelos de flujo de la cuenca, utilizando la metodología propuesta en este trabajo, hidrogeoquímica, geofísica, ensayos de bombeo y las mediciones de niveles y caudales, para evaluar las influencias que pueda ejercer el tranque de relave en la cuenca.

11. REFERENCIAS

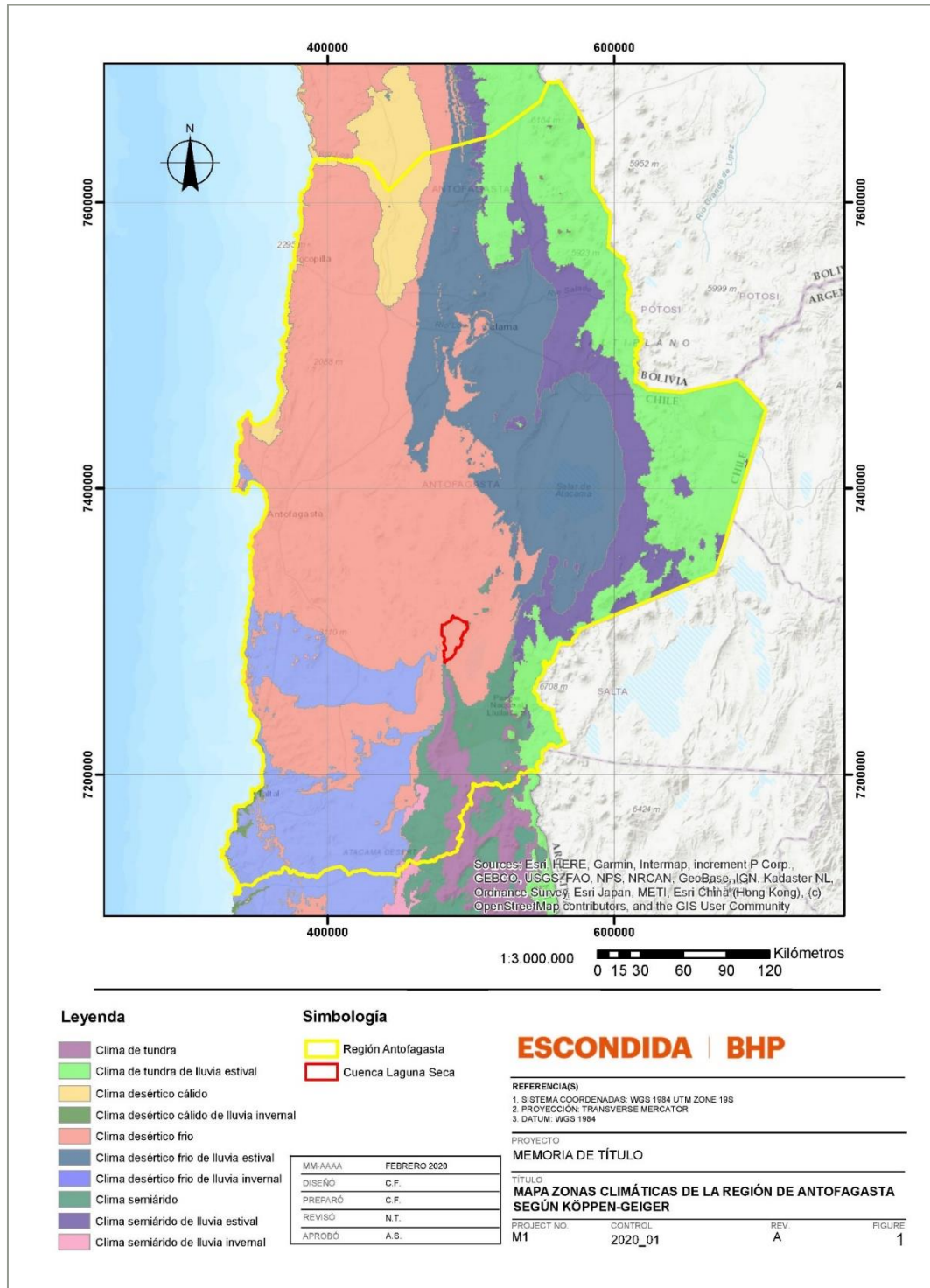
- ARAVENA, R.; SUZUKI, O.; PENA, H.; POLLASTRI, A.; FUENZALIDA, H. & GRILLI, A. 1999. Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile. *Applied Geochemistry*. Vol. **14**, (4): 411-422.
- APPELO, C. & POSTMA, D. 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC Press. 648 pp. Amsterdam.
- ARCADIS. 2019. Informe de caracterización geotécnica embalse de relaves Laguna Seca.
- ARCADIS. 2020. Estudio de erosión interna depósito de relaves laguna seca.
- AUGE, M. 2008. *Métodos Geoelectrónicos para la prospección de agua subterránea*. 30 pp. Buenos Aires.
- BARTRAM, J. & BALLANCE, R. 1996. *Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programs*. World Health Organization & United Nations Environment Programme. 383 pp. Londres.
- BHP. 2020. Informe de Sustentabilidad 2019. 70 pp.
- BOSCHETTI, T.; CIFUENTES, J.; LACUMIN, P. & SELMO, E. Local Meteoric Water Line of Northern Chile (18° S–30° S): An Application of Error-in-Variables Regression to the Oxygen and Hydrogen Stable Isotope Ratio of Precipitation. *Water*.
- BOUJÓN, P. 2014. Estudio de la contaminación de aguas subterráneas por métodos geofísicos e hidrogeológicos. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Buenos Aires.
- BURBANK, D. W. & ANDERSON, R. S. 2001. *Tectonic geomorphology*. Blackwell Publishing. 274 pp.
- CELIS, D. 2012. Análisis del modelo del balance de aguas del tranque de relaves laguna seca y de su impacto económico en los procesos de minera escondida limitada. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso: 113 pp., Valparaíso.
- CHONG, G. 1973. Reconocimiento Geológico del área Catalina-Sierra de Varas y estratigrafía del Jurásico del Profeta, provincia de Antofagasta. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología: 284 pp.
- CIREN. 2016. Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos: Suelos, II Región de Antofagasta.
- CRAIG, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*: 1072-1073.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M. 1998. *Hidrogeología Subterránea*, Tomo I y II. Editorial Omega, Segunda Edición: 2391 pp. Barcelona.
- DGA. (1987). *Balance hídrico de Chile*.
- ESCONDIDA BHP. 2020. Informe Trimestral Monitoreo Tranque de Relaves Laguna Seca. 28 pp. Antofagasta.
- ESPINOZA, F.; MATTHEWS, S. & CORNEJO, P. 2012. Carta Los Vientos, Región de Antofagasta. 72 pp. 1 mapa escala 1:100.000.
- GARCÍA, F. 1967. Geología del norte grande de Chile. Symposium sobre el geosinclinal andino. Sociedad Geológica de Chile. Vol. **3**. 138 pp. Santiago.
- GARDEWEG, M.; RAMIREZ, C. F. & DAVIDSON, J. 1993. Mapa geológico del área del Salar de Punta Negra y del Volcán Llullaillaco. Región de Antofagasta. 1 mapa escala 1:100.000.

- GOLDER ASSOCIATES S.A. 2018. Estudio hidrogeológico del Tranque Laguna Seca: Modelo Conceptual.
- GOLDER ASSOCIATES S.A. 2019. Informe: Estabilidad geoquímica para plan de cierre (PDC) de MEL: Estudio Regional Línea Base de Clima y Meteorología.
- GONZÁLEZ, R.; WILKE, H.; MENZIES, A.; RIQUELME, R.; HERRERA, C.; MATTHEWS, S.; ESPINOZA, F. & CORNEJO, P. 2015. Carta Sierra de Varas, Región de Antofagasta. 1 mapa escala 1:100.000.
- HATCH, 2017. 6th Lift retaining Wall – Engineering Study Laguna Seca Tailings Dam Class 3 Interim Engineering.
- MAKSAEV, V.; MARINOVIC, N.; SMOJE, I. & MPODOZIS, C. 1991. Mapa geológico de la hoja Augusta Victoria, Región de Antofagasta. 1 mapa escala 1:100.000.
- MARINOVIC, N.; SMOJE, I.; MAKSAEV, V.; HERVÉ, M. & MPODOZIS, C. 1995. Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta. 142 pp., 1 mapa escala 1:250.000.
- NIEMEYER, H. & URRUTIA, C. 2009. Transcurrencia a lo largo de la Falla Sierra de Varas (Sistema de fallas de la Cordillera de Domeyko), norte de Chile. *Andean geology*. Vol. **36** (1): 37-49.
- QUADE, J.; RECH, J.; BETANCOURT, J.; LATORRE, C.; QUADE, B.; RYLANDER, K. & FISHER, T. 2008. Paleowetlands and regional climate change in the central Atacama Desert, northern Chile. *Quaternary research*, Vol. **69** (3), 343-360.
- SÁNCHEZ, A. & MORALES, R. 2000. Las regiones de Chile. Editorial Universitaria. Santiago.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4. Santiago.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL (SEA). 2012. Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA. 108 pp.
- SINGHAL, B.B.S. & GUPTA, R.P. 2010. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Springer Science & Business Media: 408 pp.
- SMOJE, I. & MARINOVIC, N. 1994. Intrusivos del Carbonífero Pérmico en la Cordillera de Domeyko: nuevos antecedentes radiométricos. In Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas 2: 1213-1216. Concepción.
- SOLARI, M.; VENEGAS, C.; MONTECINO, D.; ASTUDILLO, N.; CORTÉS, J.; BAHAMONDES, B. & ESPINOZA, F. 2017. Geología del área Imilac-Quebrada Guanaqueros, Región de Antofagasta. 88 pp., 1 mapa escala 1:100.000.
- STERRETT, R. 2007. Groundwater and wells. Johnson Screens: 812 pp.
- ULRIKSEN, C. 1974. Regional geology, geochronology and metallogeny of the Coastal Cordillera of Chile between 25°30' and 26° South. M. Sc. Thesis, Dalhousie University: 221 pp. Canada.
- URZÚA, F. 2009. Geology, geochronology and structural evolution of La Escondida copper district, northern Chile. Ph.D. Thesis (Unpublished), University of Tasmania: 486 pp. Hobart.
- VÁZQUEZ-SUÑE E. 2009. Hidrogeología. Conceptos básicos de Hidrología Subterránea. Editor Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Publicado por Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS).
- VILLA, V.; RAMÍREZ, C.; FERRANDO, R.; MONTECINO, D. & LIENLAF, M. 2019. Geología de las áreas Salar Punta Negra y Cerro Sur Bayo, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 202-203: 130 pp. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

ANEXOS

ANEXO 1. Climatología.

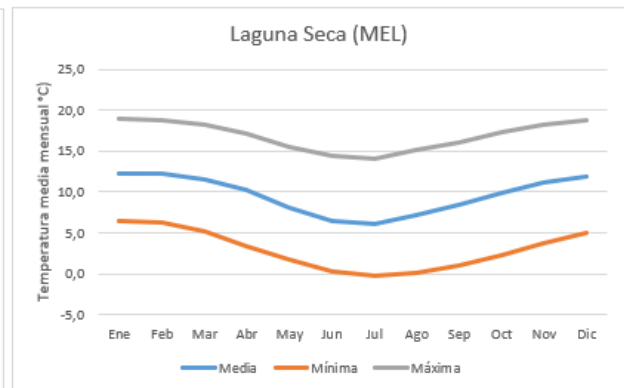
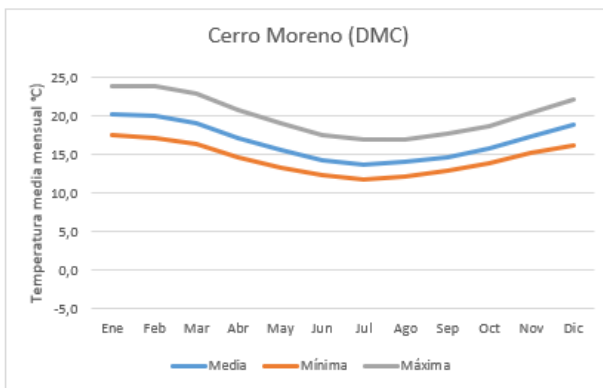
1. Mapa de Climatología para la Región de Antofagasta.



2. Temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales (°C). Estación Laguna Seca (MEL).

Temperatura	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Mínima	6,4	6,2	5,2	3,3	1,7	0,3	-0,3	0,1	1,1	2,2	3,7	5,0	2,9
Media	12,3	12,2	11,5	10,2	8,1	6,5	6,1	7,2	8,4	9,8	11,1	11,9	9,6
Máxima	19,0	18,8	18,3	17,1	15,5	14,3	14,1	15,1	16,0	17,2	18,2	18,8	16,9

3. Registro de temperatura media, máxima y mínima mensual estación Cerro Moreno (DMC) y Laguna Seca (MEL).



ANEXO 2. Datos obtenidos con el software EASYQUIM.

Date	LSP-6	LSP-13	LSP-15	LSP-16	LSP-18	LSP-19	LSP-20	LSP-21	LSP-22	LSO-4	LSO-5	LSO-6	LSO-7A	LSO-7B	LSO-21A	LSO-22	LSO-51	LSV-1	Fase líquida	
SAMPLE	mg/L		mg/L		mg/L		mg/L		mg/L		mg/L		mg/L		mg/L		mg/L		mg/L	
Anion																				
HCO3-	31.55	74.65	119.07	118.62	96.00	72.22	70.33	64.86	72.16	66.99	116.97	159.05	175.45	96.61	129.52	117.84	36.64	155.61	16.67	
SO4=	2349.58	1933.23	2300.77	2229.85	1938.85	2586.08	2433.92	2539.69	2327.54	2481.31	2327.38	2652.54	2435.25	2396.85	2254.54	2328.85	2720.92	2620.25	2472.25	
Cl-	2423.00	2509.31	2533.77	2478.85	2358.69	2281.00	2363.08	2285.62	2482.08	2487.08	1723.23	1075.85	2319.00	2369.31	1524.62	1150.54	502.77	1098.69	1718.58	
NO3-	1188.08	1478.86	1116.81	1010.73	1334.89	963.48	928.79	903.35	1038.58	1307.73	759.39	215.43	828.43	1080.84	5.39	42.80	5.70	268.02	405.02	
sum aniones	6052.2167	5396.048	6070.413	5838.039	5728.4292	5908.78	5796.116	5793.522	5920.354	6343.105	4326.978	4102.872	5818.125	5343.603	3914.056	3640.022	3266.035	4142.568	4612.523	
Cation																				
Na+	1807.17	1518.00	1835.77	1765.00	1418.69	1859.62	1786.15	1784.23	1851.23	1971.23	1205.54	1007.31	1816.00	1920.77	1238.54	903.39	919.16	1003.99	1427.17	
K+	34.78	84.80	93.69	97.29	69.53	103.75	95.39	100.86	96.02	101.94	80.12	57.61	82.16	102.30	17.36	19.62	14.30	57.19	185.23	
Ca++	791.33	931.38	816.60	795.21	943.54	712.51	760.87	733.80	749.39	751.41	702.96	583.05	659.90	751.56	667.26	509.16	537.24	611.55	892.30	
Mg++	271.75	276.59	296.33	297.39	332.09	236.47	220.96	223.78	226.20	243.55	332.65	260.68	255.58	252.55	61.45	211.25	84.74	263.34	26.86	
sum cationes	2965.0232	2810.77	3042.386	2954.895	2763.8546	2912.337	2862.963	2842.664	2922.842	3068.127	2321.269	1903.246	2813.633	3021.175	1984.614	1643.418	1556.044	1942.274	2531.618	
Cl--NO3-	3611.0833	3988.171	3650.575	3489.578	3693.5831	3250.48	3291.862	3188.968	3520.654	3794.805	2482.625	1291.28	3147.425	3450.149	1530.001	1193.337	508.4731	1366.71	2123.607	
Na++K+	1901.95	1602.795	1929.455	1862.286	1488.2269	1963.364	1881.54	1885.087	1947.252	2073.168	1285.658	1065.521	1898.158	2023.067	1255.898	923.0108	934.0577	1067.182	1612.458	
anions (meq/L)																				
HCO3-	1.50	1.22	1.95	1.94	1.57	1.18	1.15	1.06	1.18	1.10	1.92	2.61	2.88	1.58	2.12	1.93	0.60	2.55	0.27	
SO4=	48.35	40.28	47.93	46.46	40.39	53.88	50.71	52.91	48.49	51.69	48.49	55.26	51.98	49.93	46.97	48.52	56.69	54.59	51.51	
Cl-	68.25	70.68	71.37	69.83	66.44	64.25	66.57	64.38	69.92	70.06	48.54	30.31	65.32	66.74	42.95	32.41	14.16	30.95	48.41	
NO3-	19.16	23.85	18.01	16.30	21.53	15.64	14.98	14.57	16.75	21.09	12.25	3.47	13.36	17.43	0.09	0.69	0.09	4.32	6.53	
Cl--NO3-	87.42	94.54	89.39	86.13	87.97	79.89	81.55	79.35	86.67	91.15	60.79	33.78	78.69	84.17	43.03	33.10	14.25	35.27	54.94	
sum aniones	137.87	136.04	139.27	134.53	129.94	134.95	133.41	132.93	136.34	143.94	111.19	91.65	133.55	135.69	92.13	83.55	71.54	92.41	106.72	
cations (meq/L)																				
Na++K+	81.00	68.17	82.21	79.23	63.46	83.51	80.10	80.15	82.94	88.31	54.46	45.30	81.06	86.13	54.29	39.78	40.34	45.38	66.79	
Na+	78.57	66.00	79.82	76.74	61.68	80.85	77.66	77.58	80.49	85.71	52.41	43.82	78.96	83.51	53.85	39.28	39.96	43.31	62.05	
K+	2.42	2.17	2.40	2.49	1.78	2.65	2.44	2.58	2.46	2.61	2.05	1.47	2.10	2.62	0.44	0.50	0.38	1.46	4.74	
Ca++	39.57	46.57	40.83	39.76	47.18	35.63	38.04	36.69	37.47	37.57	35.15	29.15	33.00	37.58	33.36	25.46	26.86	30.58	44.62	
Mg++	22.46	22.86	24.49	24.58	27.45	19.54	18.23	18.49	18.69	20.13	27.49	21.54	21.12	20.87	5.08	17.46	7.00	21.78	2.22	
NH4+	0.00	0.00																		
sum cationes	143.02	137.60	147.53	143.57	138.08	138.67	136.37	135.34	139.11	146.01	117.10	95.99	135.17	144.58	92.74	82.70	74.21	97.73	113.62	
anions (%)																				
HCO3-	1.09	0.90	1.40	1.45	1.21	0.88	0.86	0.80	0.87	0.76	1.72	2.85	2.15	1.17	2.30	2.31	0.84	2.76	0.26	
SO4=	35.51	29.61	34.42	34.53	31.09	39.92	38.01	39.80	35.57	35.31	43.61	60.30	38.93	36.80	50.98	58.07	79.24	59.07	48.26	
Cl-	49.51	51.96	51.25	51.90	51.13	47.61	49.90	48.44	51.28	48.67	43.65	33.07	48.31	49.19	46.62	38.79	19.80	33.49	45.36	
NO3-	13.90	17.53	12.93	12.12	16.57	11.59	11.23	10.96	12.29	14.65	11.02	3.79	10.01	12.85	0.09	0.83	0.13	4.68	6.12	
Cl--NO3-	63.41	63.43	64.18	64.02	67.70	59.20	61.13	59.40	63.57	63.32	54.67	36.86	58.92	62.03	46.71	33.62	13.92	38.17	51.48	
sum aniones	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
cations (%)																				
Na++K+	56.63	49.54	55.72	55.19	45.96	60.22	58.74	59.23	59.63	60.48	46.51	47.19	59.37	59.57	58.55	48.10	54.37	46.43	58.78	
Na+	54.94	47.97	54.10	53.45	44.67	58.30	56.95	57.32	57.86	58.70	44.76	45.65	58.41	57.76	58.07	47.50	53.85	44.93	54.61	
K+	1.69	1.58	1.62	1.73	1.29	1.91	1.79	1.91	1.77	1.79	1.54	1.55	1.81	0.48	0.61	0.51	1.50	4.17		
Ca++	27.66	33.84	27.68	27.70	34.17	25.69	27.90	27.11	26.94	25.73	30.01	30.37	24.41	25.99	35.98	30.78	36.20	31.29	39.27	
Mg++	15.70	16.61	16.60	17.12	19.88	14.09	13.37	13.66	13.44	13.79	23.48	22.44	15.63	14.44	5.48	21.11	3.44	22.29	1.95	
NH4+	0.00	0.00																		
sum cationes	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
Ionic Relationship																				
rNa/rK	32.41	30.43	33.31	30.84	34.68	30.47	31.83	30.07	32.78	32.87	25.58	29.74	37.58	31.92	121.29	78.26	104.86	30.02	13.09	
rMg/rCa	0.57	0.49	0.60	0.62	0.58	0.55	0.48	0.50	0.50	0.54	0.78	0.74	0.64	0.56	0.15	0.63	0.26	0.71	0.05	
rSO4/rCl	0.72	0.57	0.67	0.67	0.61	0.84	0.76	0.82	0.63	0.74	1.00	1.82	0.80	0.75	1.09	1.50	4.00	1.76	1.06	
rCl/rHCO3	45.48	57.76	36.57	35.91	42.22	54.27	57.73	60.55	59.10	63.79	25.31	11.62	22.71	42.14	20.23	16.78	23.58	12.13	17.18	
icb	-0.19	0.04	-0.15	-0.13	0.04	-0.30	-0.20	-0.24	-0.19	-0.26	-0.12	-0.49	-0.29	-0.26	-0.23	-0.23	-1.85	-0.47	-0.38	
Kr	4.47	4.12	5.38	5.32	4.83	3.68	3.70	3.46	3.74	3.57	5.06	5.83	6.43	4.55	5.32	4.56	2.13	5.84	1.49	
INDEX SAR	14.1	11.2	14.0	13.5	10.1	15.4	14.6	14.8	15.2	16.0	9.4	8.7	15.2	15.4	12.3	8.5	9.7	8.6	12.8	
Error (%)																				
Laboratory	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament	Ajustament
Error (%)	3.67	1.14	5.76	6.50	6.08	2.72	2.20	1.80	2.01	1.43	5.18	4.63	1.21	6.34	0.66	-1.03	3.66	5.60	6.27	

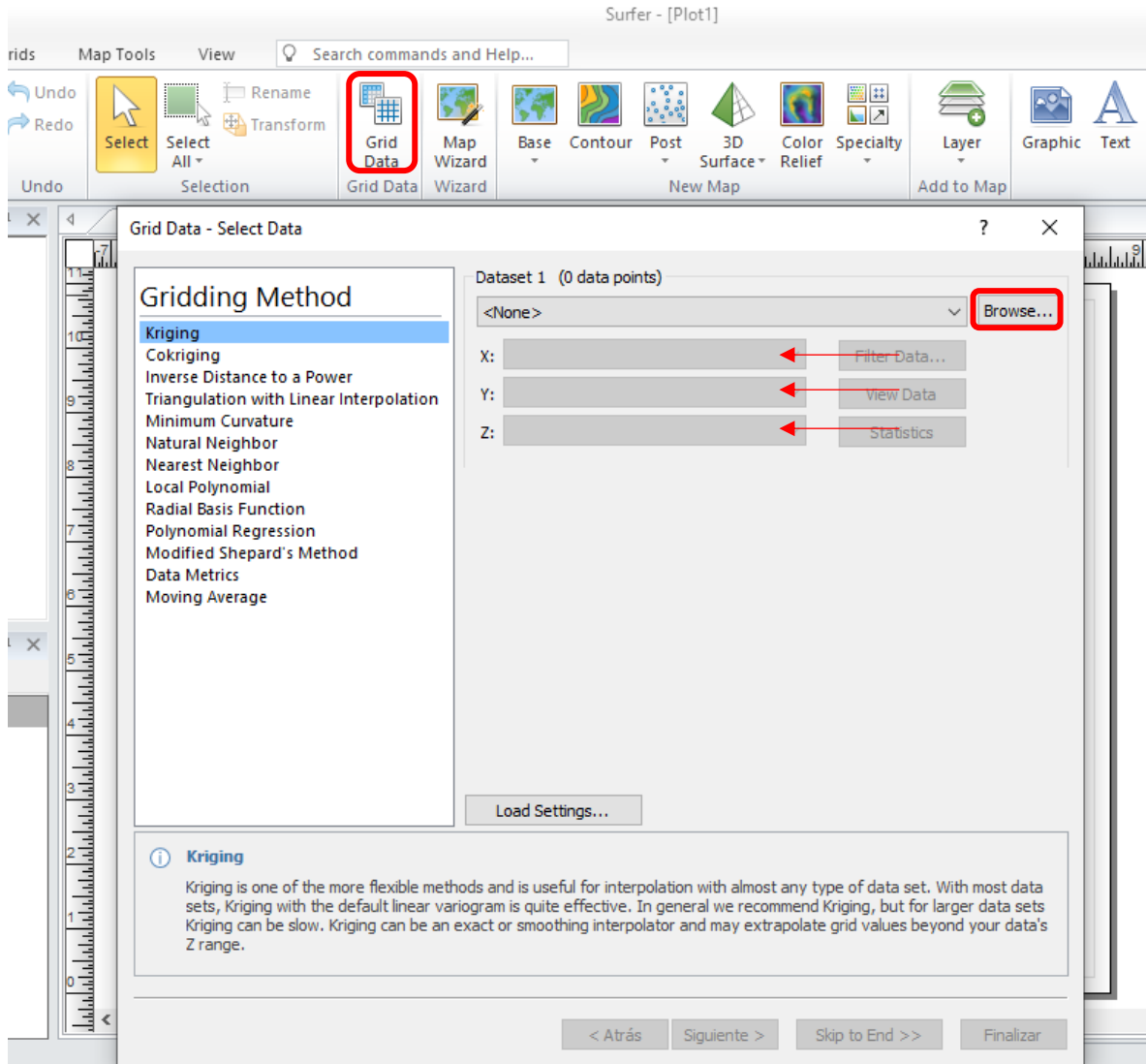
icb=(rCl-(rNa+rK))/rCl

kr=(rCa*(rHCO3)^2)/(rMg)

Error(%)=200*(rCat-rAn)/(rCat+rAn)

ANEXO 3. Pasos para trabajar en Surfer (V.18)

1. Exportar datos desde ArcGis. Base de datos coordinados con datos de altura para topografía (x-y-z). O basemap también puede ser shp. (ej. cuenca).



2. Grid → Browse → se elige el archivo con los puntos a mapear en formato txt.

Data Import Options - random points area estudio.txt

Field Format

Delimited (fields are separated by tabs or other characters)

Fixed width (each field is a fixed number of characters wide)

Start import at row: 1

OK

Cancel

Delimiters

Tab Semicolon Other:

Comma Space

Text Qualifiers

"Double quote"

'Single quote'

Skip leading spaces

Treat consecutive delimiters as one

Use comma as decimal symbol

Preview of C:\Users\Casa\Desktop\catalina-20200725T222123Z-001\catalina\Laguna Seca\Proyectos

1	X	Y	Z
2	493797.2641	7309824.015	3128.745483
3	503020.5912	7285122.975	2989.171339
4	481045.4221	7291301.482	3401.951956
5	488626.9318	7286626.066	3174
6	496924.3798	7297432.002	3380
7	494157.6455	7306546.784	3467.109202
8	477551.8496	7284598.929	2933.721061
9	483385.437	7288818.87	3343.644939
10	481006.0592	7288399.91	3240.229292

Encoding

The assumed text encoding is: Unicode ANSI

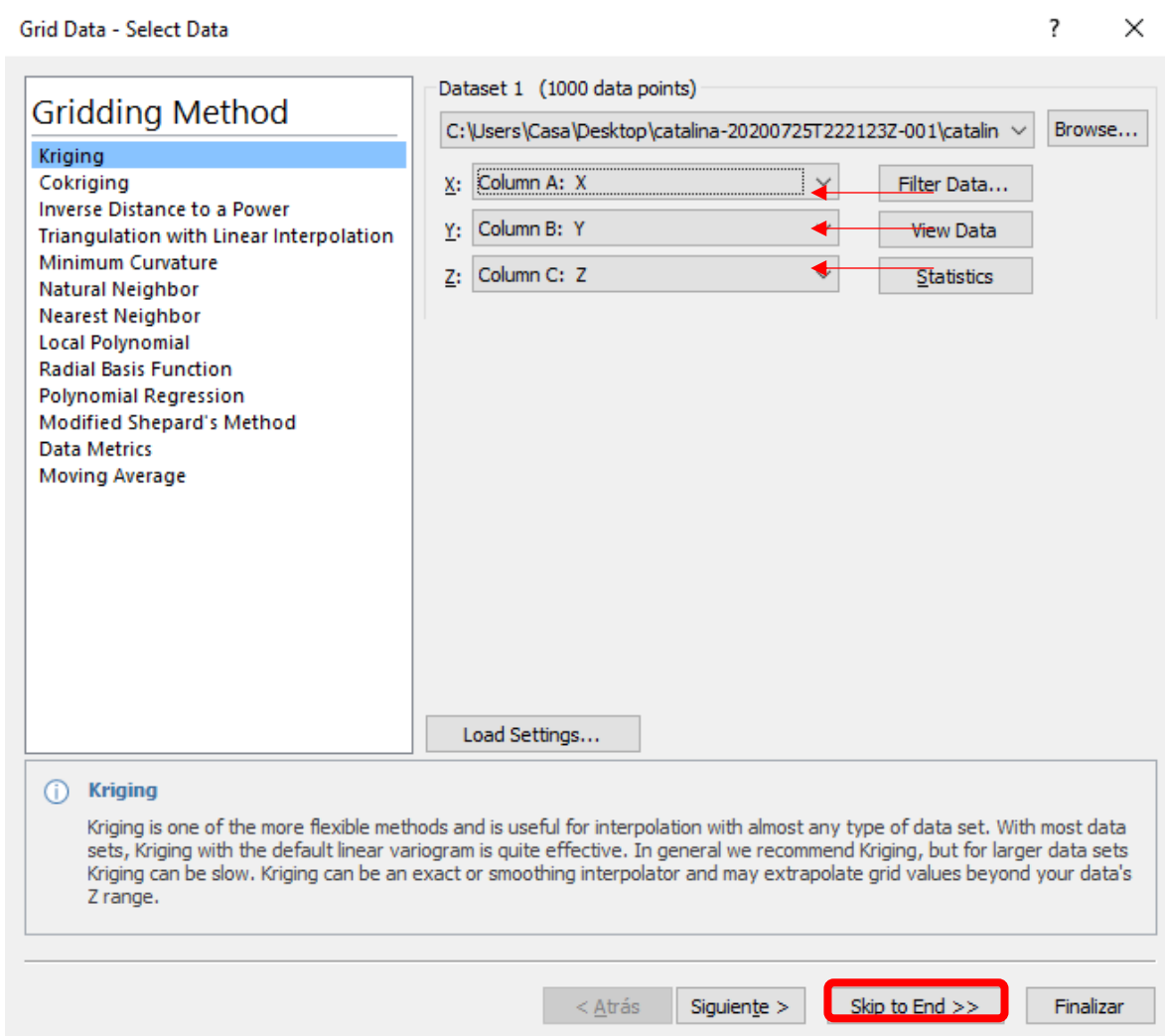
ANSI text translation [codepage]: Machine Local (Windows) - [0]

Locale

Language (Country): Spanish (Chile) - [13322]

Date order: Auto

3. Agregar las columnas a las letras correspondientes (x,y,z) y luego saltar hasta el final.



4. En esta pestaña se elige la carpeta de destino, donde se guardará el proyecto y luego finalizar.

Grid Data - Kriging - Output

Output Grid Geometry

Copy geometry from: <None> Browse...

	Minimum	Maximum	Spacing	# of Nodes
X Direction:	472776.0663	503074.7025	398.6662657894	77
Y Direction:	7274370.937	7313826.352	398.5395454545	100

Grid Z Limits

Minimum: None

Maximum: None

Assign NoData outside convex hull of data

Inflate convex hull by: 0

Z Transform: Linear

NoData Polygon Boundary

<None> Browse...

Loaded 0 polygons total (0 inside, 0 outside)

NoData Inside NoData Outside Mixed Selected objects only

Output Grid

C:\Users\Casa\Desktop\catalina-20200725T222123Z-001\catalina\Laguna Seca\Proyecto

Grid Report

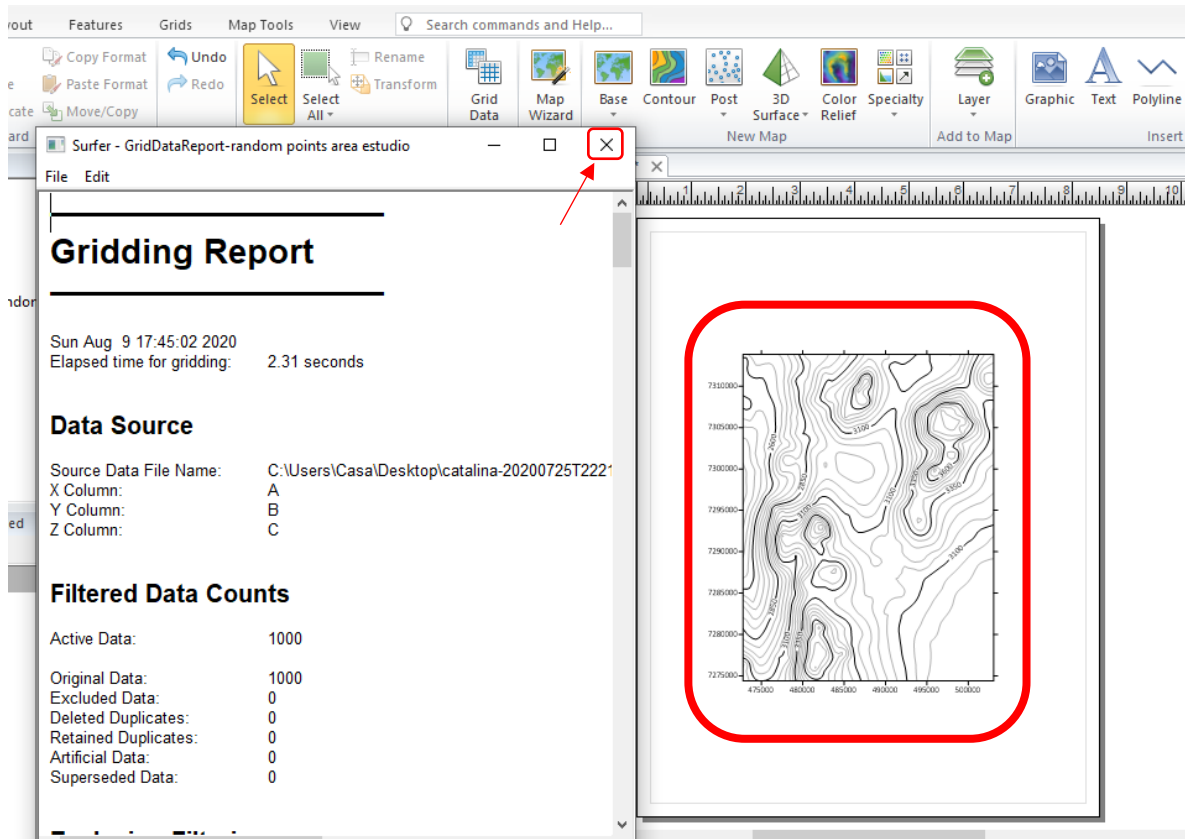
Add grid as layer to: [New Map]

New layer: Contour

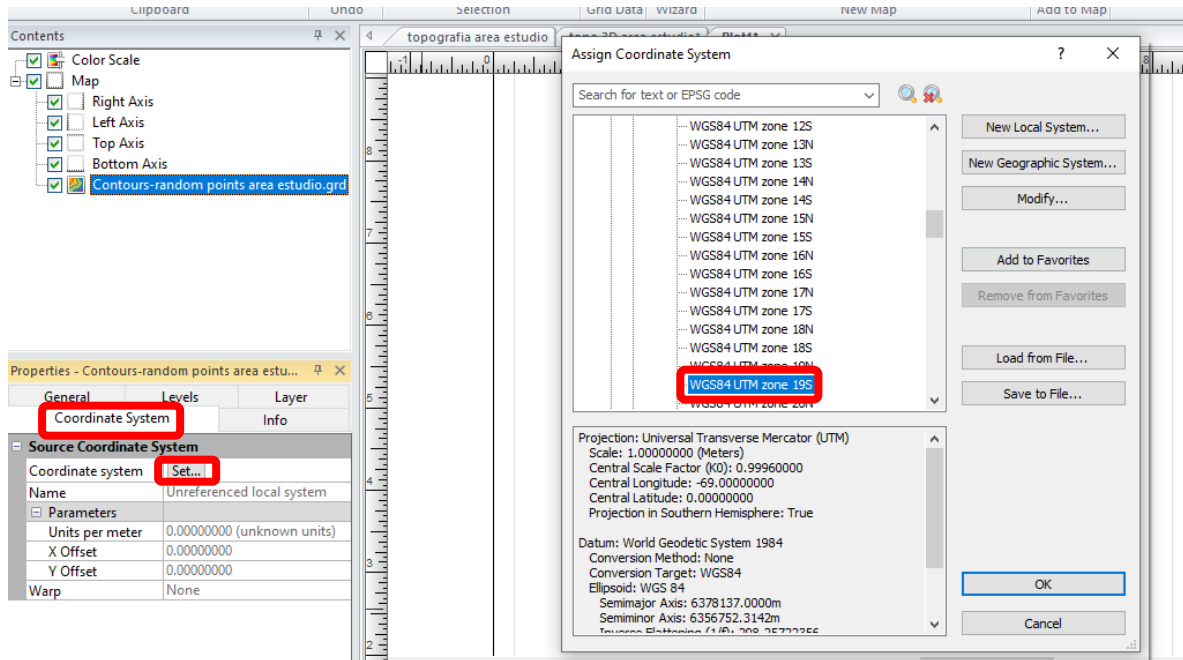
Save Settings...

< Atrás Siguiente > Skip to End >> Finalizar

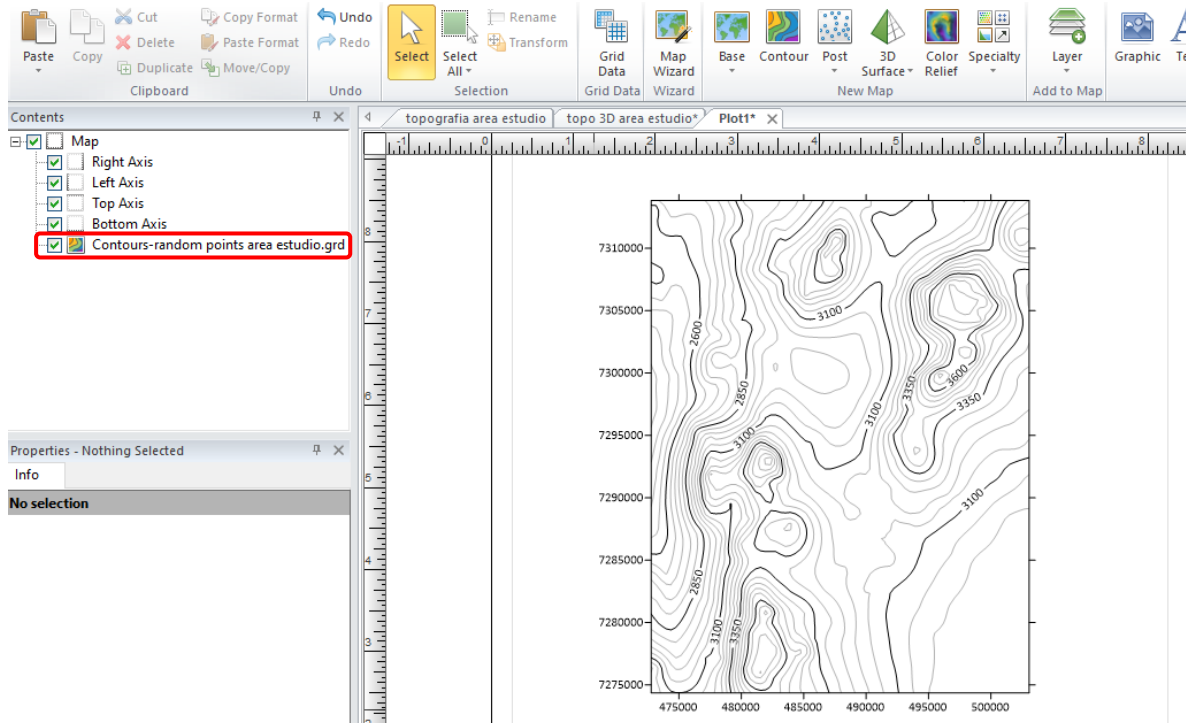
5. Luego de presionar Finalizar, aparecerá un cuadro de diálogo que no es necesario conservar. Finalmente agregamos la topografía usando el comando CONTOUR.



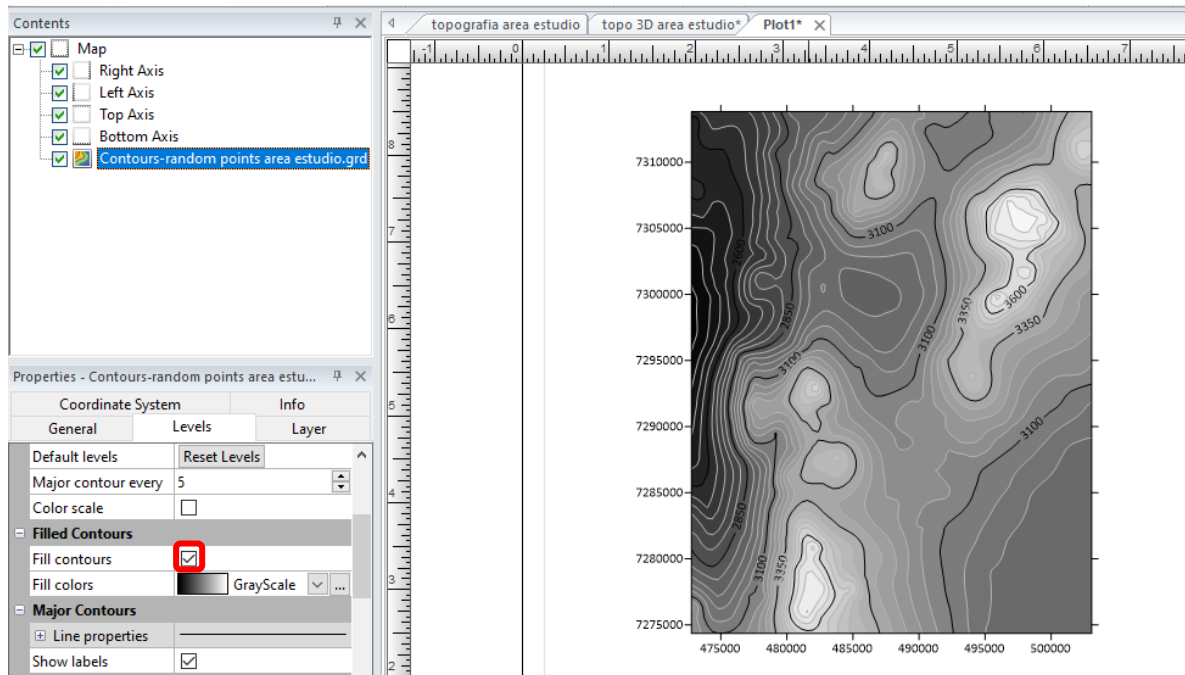
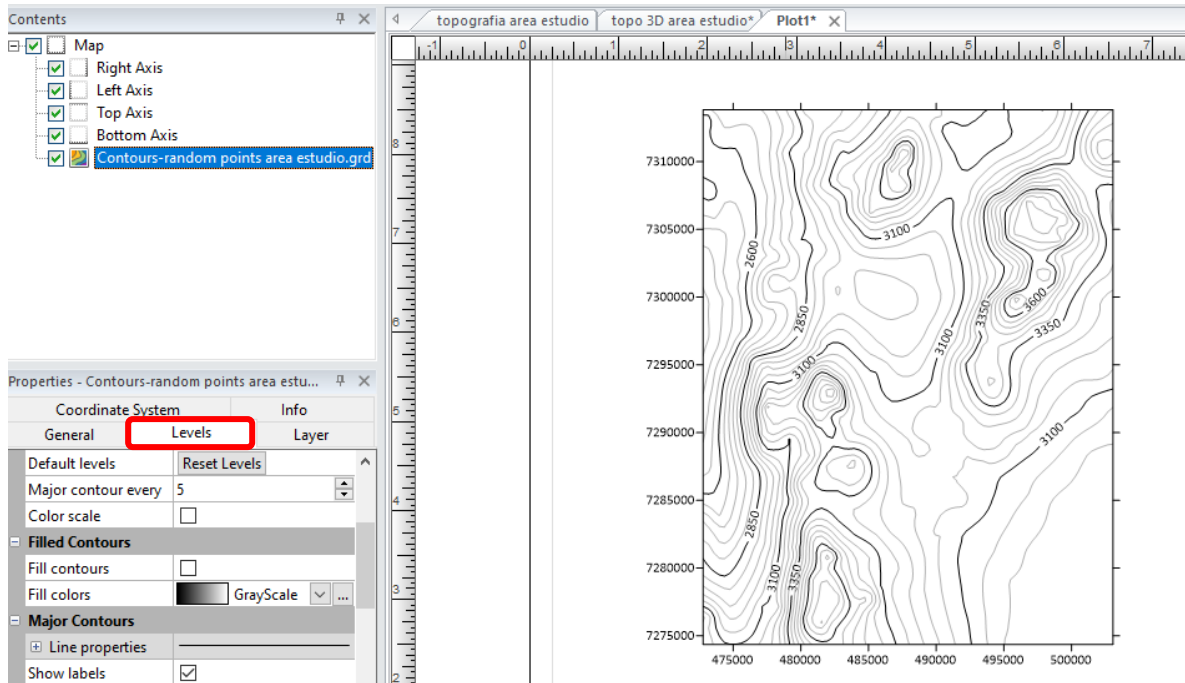
6. Agregar sistema de coordenadas → set → Projected systems → UTM → WGS84 → WGS84 UTM zone 19S.



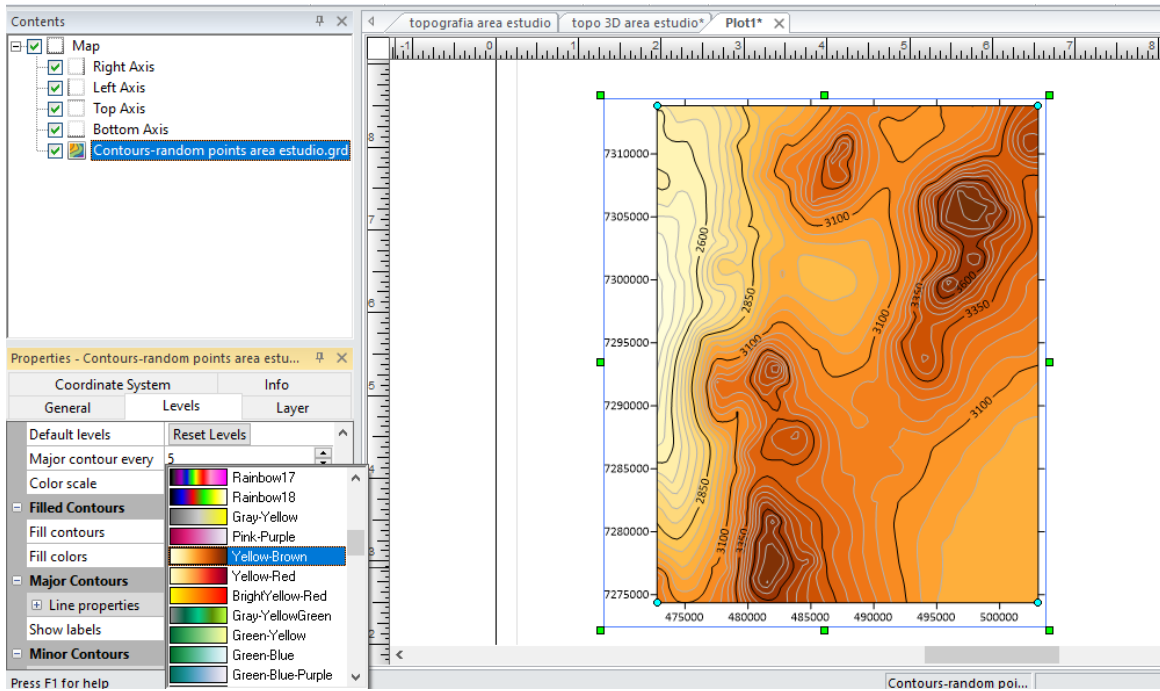
7. Ya tenemos el mapa de contorno con las curvas de nivel y las alturas para cada uno. Si queremos agregar color presionar Contours-“nombre del archivo”



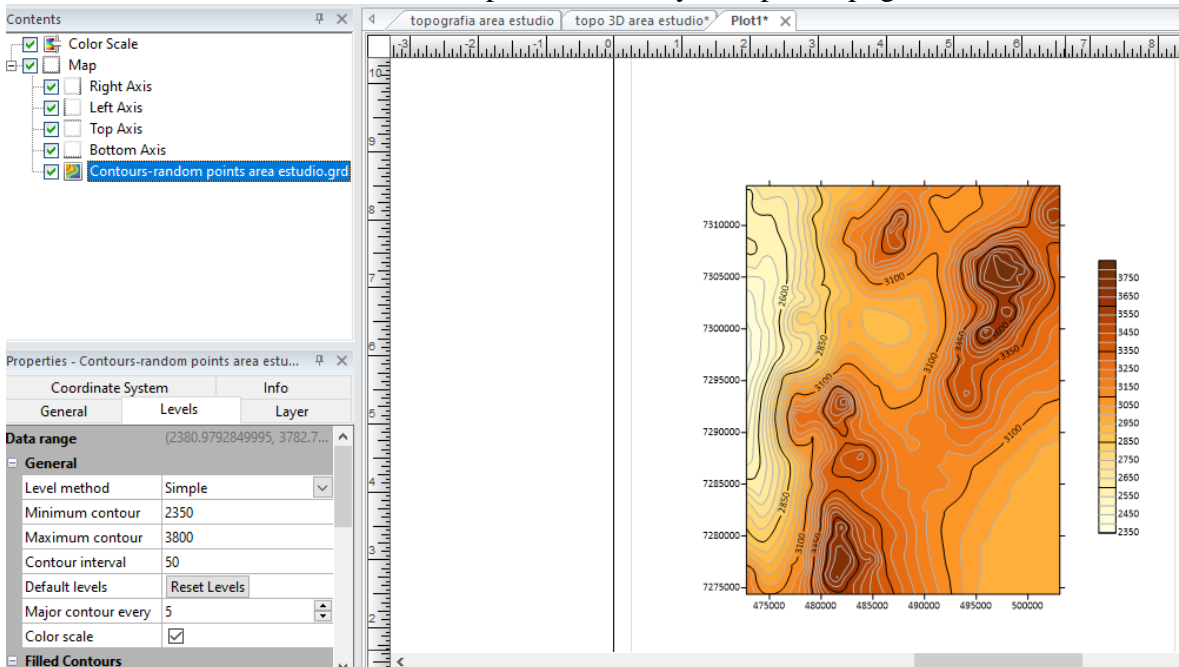
8. Seleccionar la pestaña LEVELS y seleccionar FILL CONTOURS.



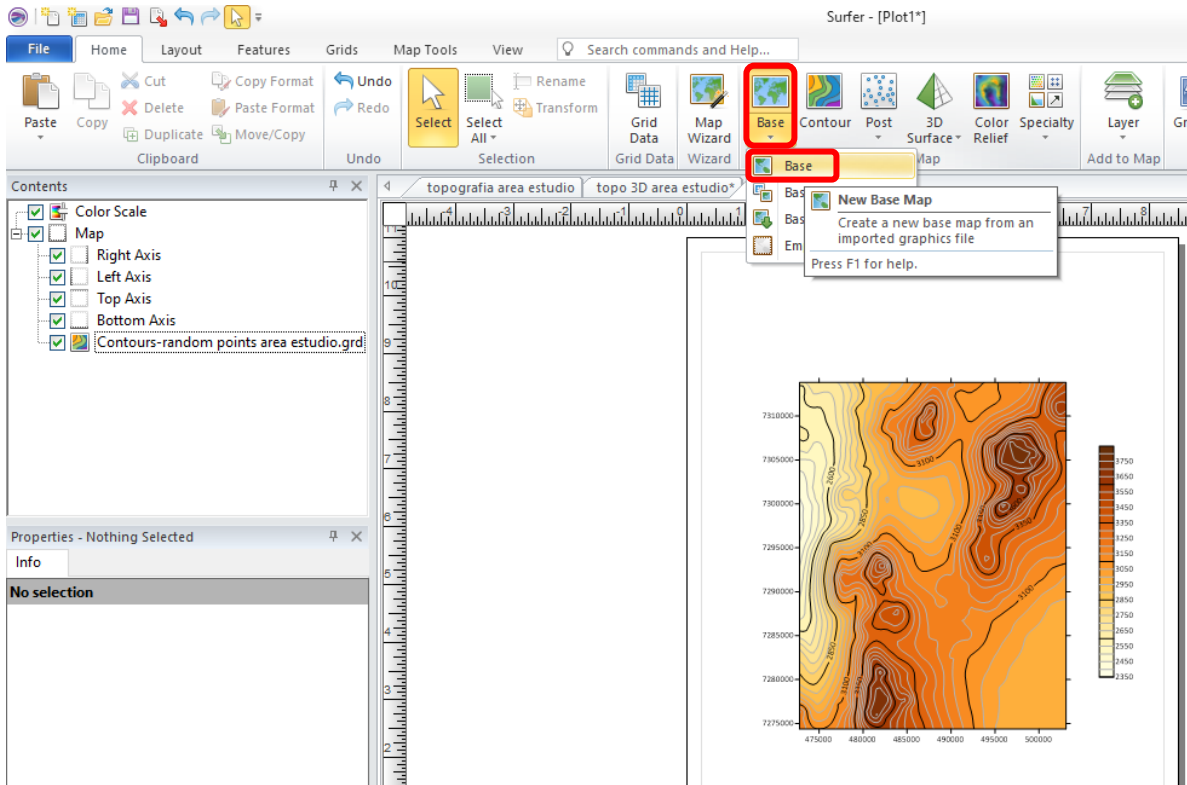
9. Seleccionar una gama de colores.



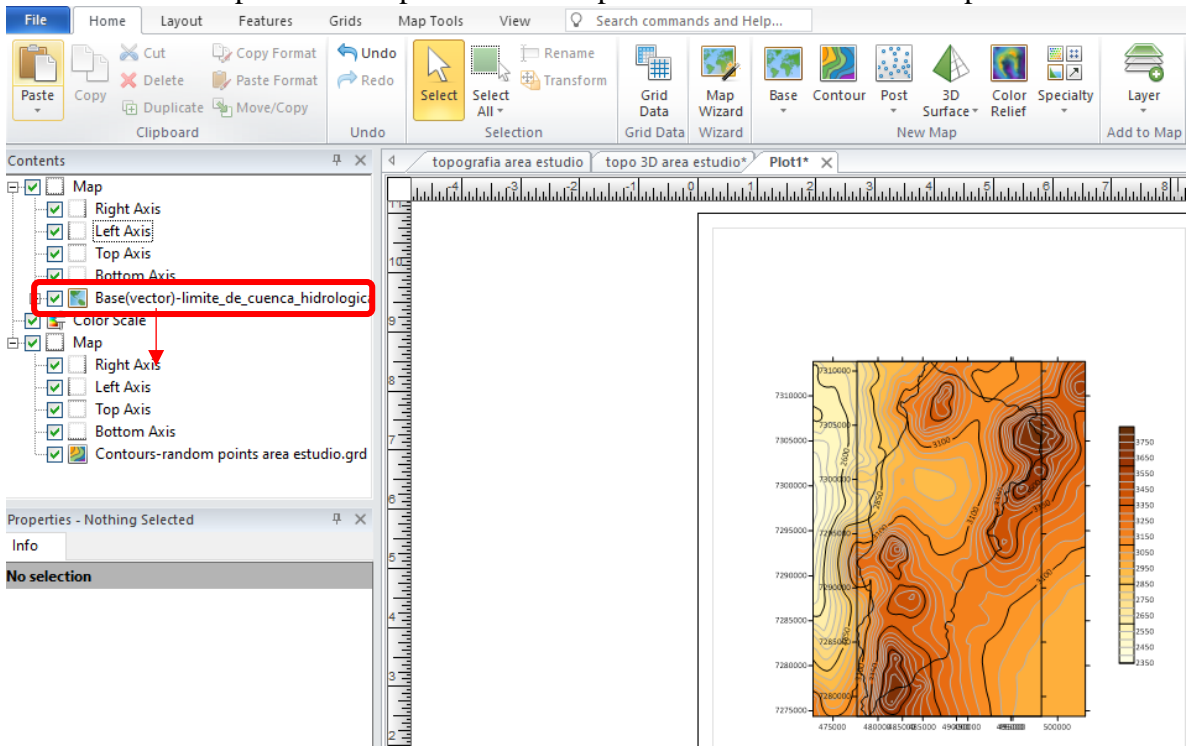
10. Seleccionar COLOR SCALE para insertar leyenda para topografía.

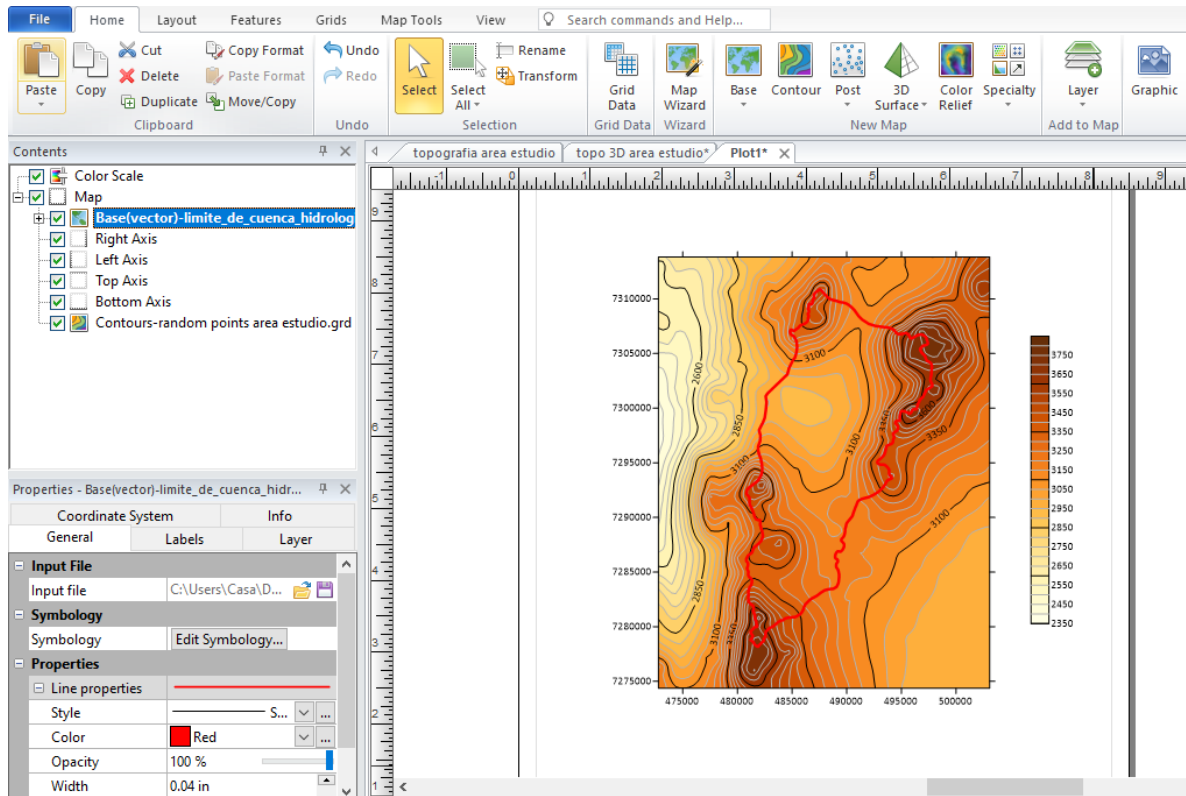


11. Para agregar contorno de la cuenca, seleccionar Base, new base map. Y seleccionar shp. de la cuenca.



12. Mover mapa base a mapa de contorno para unir todo en un solo mapa.

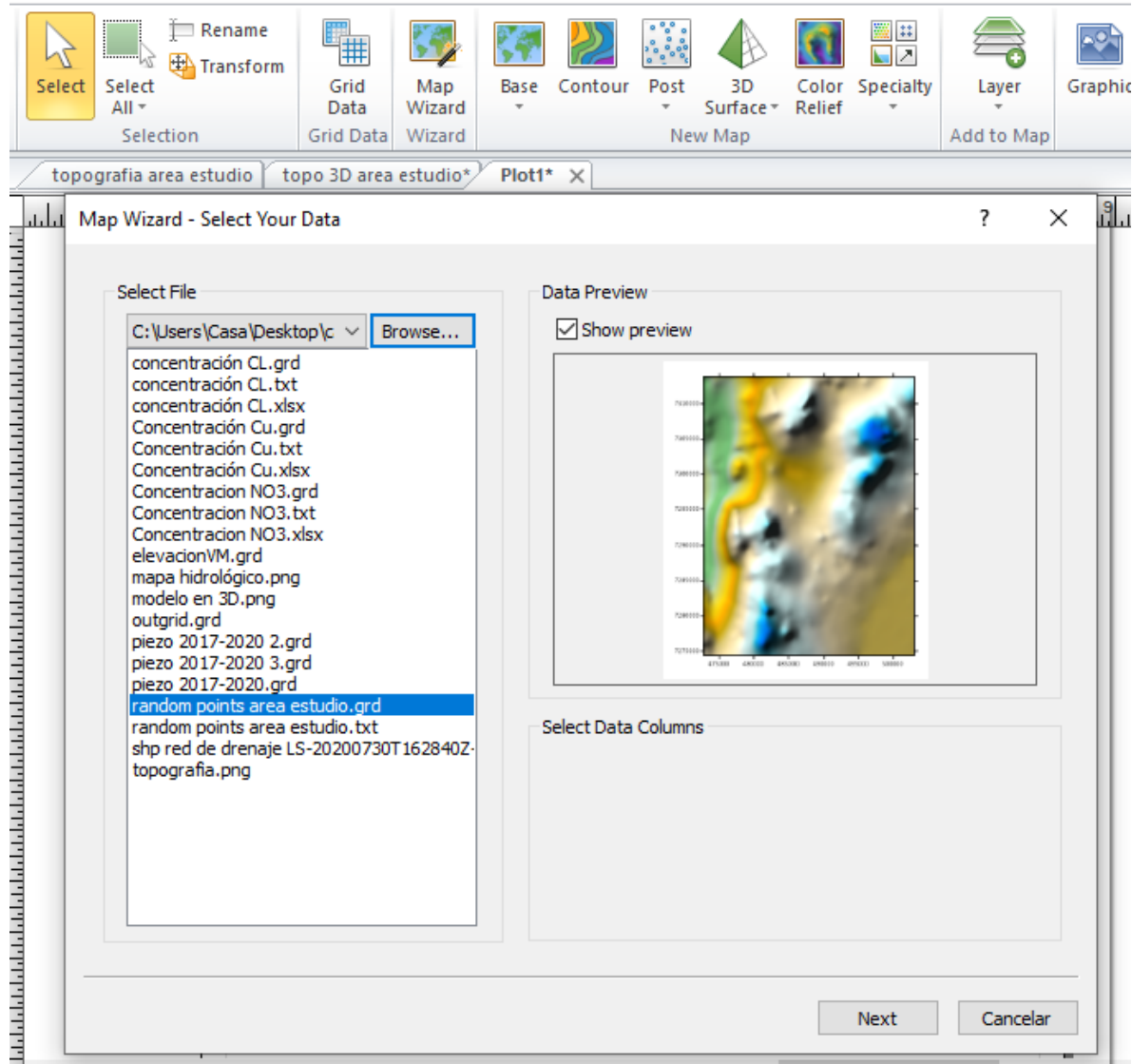




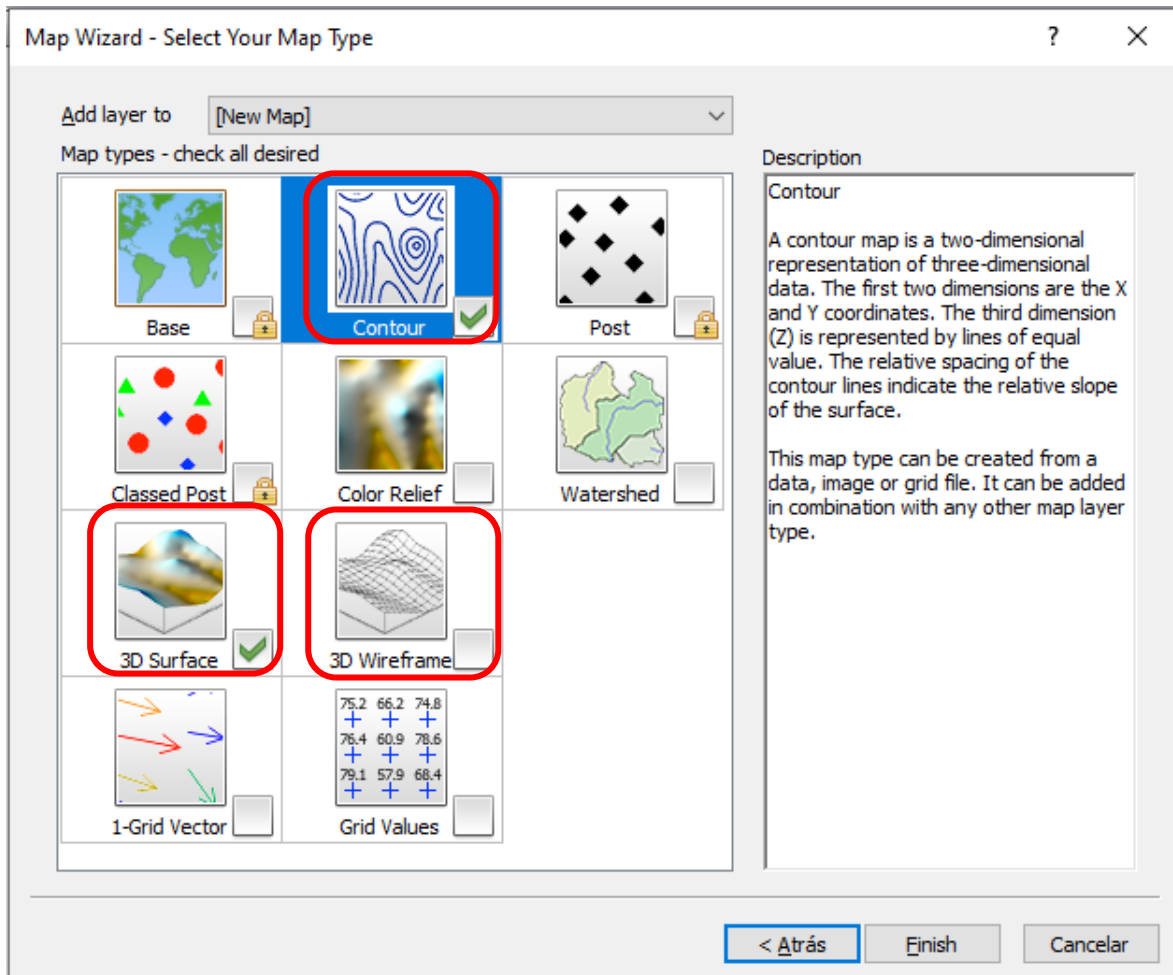
Listo! Primer mapa de topografía!

Ahora, para que este mapa pueda visualizarse en 3D.

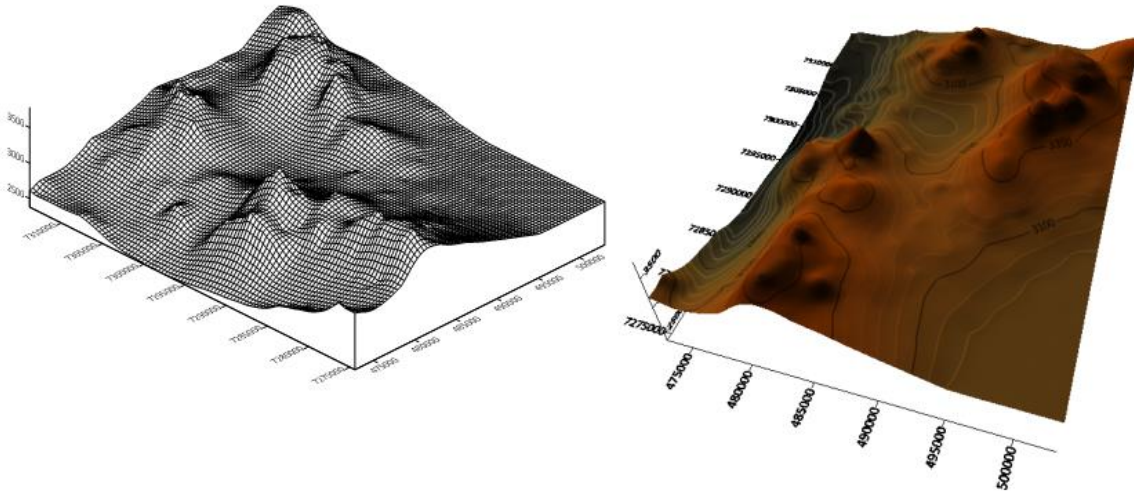
13. Seleccionar el comando MAP WIZARD → seleccionar el archivo de topografía creado anteriormente en formato grd.



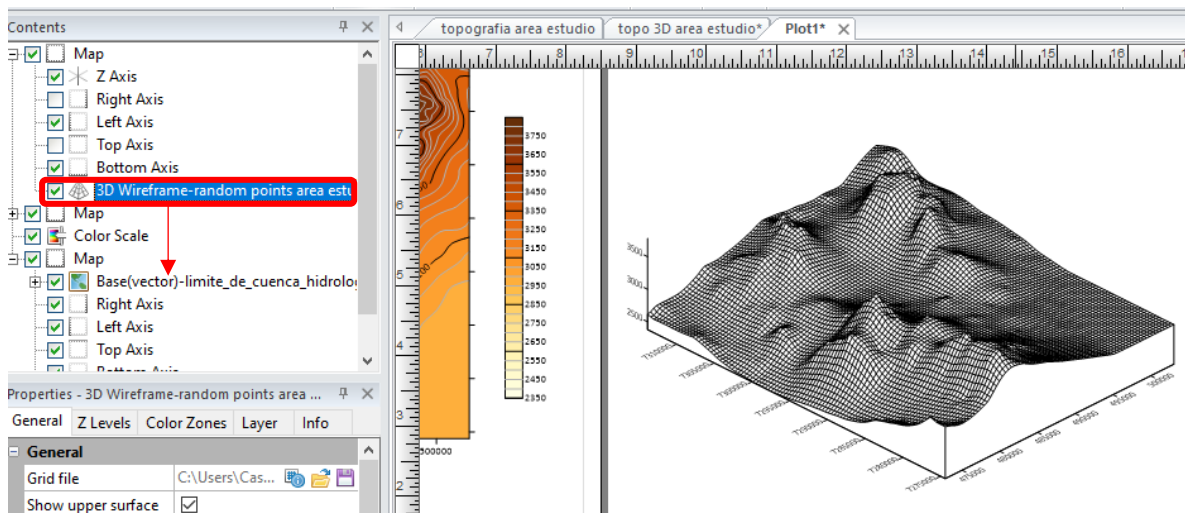
14. Seleccionar las opciones contour, 3D Surface y 3D wireframe



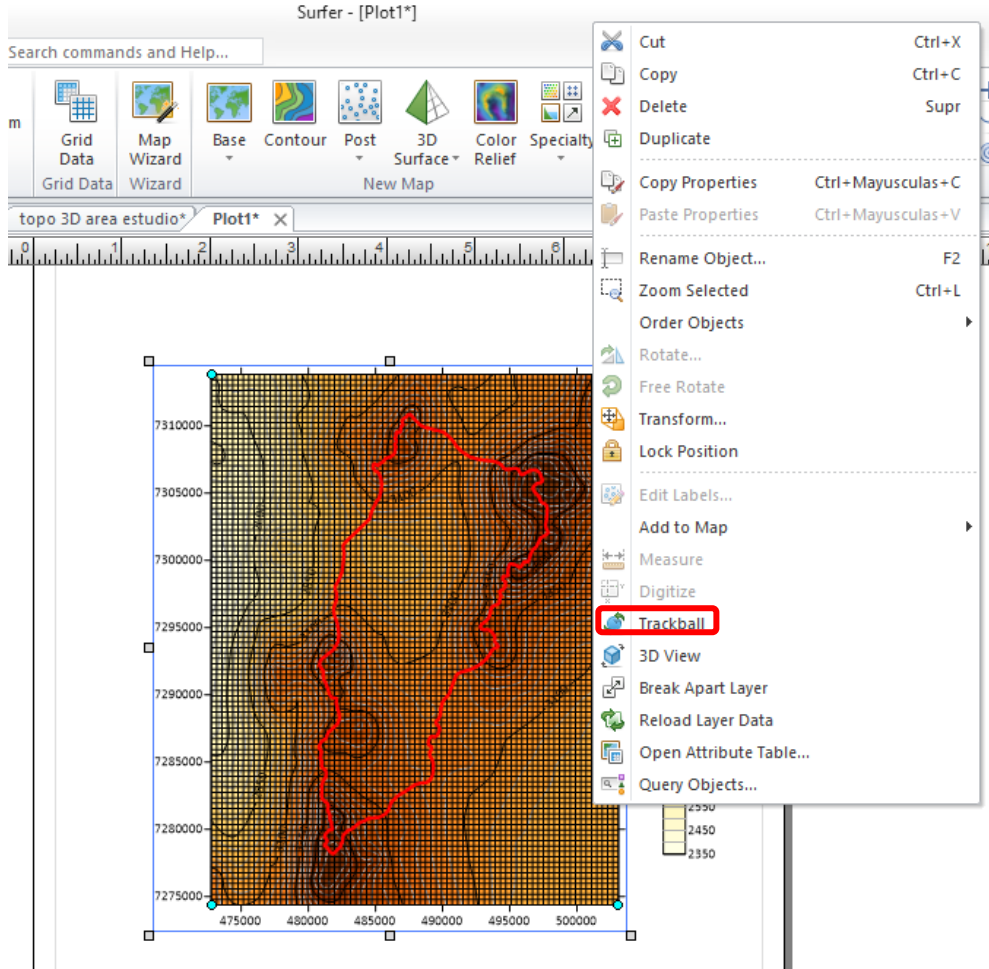
15. Resultado:



16. Los mapas 3D se pueden unir con los mapas anteriores desplazando 3D WIREFRAME al mapa de contorno creado anteriormente



16. Una vez unido ambos mapas, apretar botón derecho sobre ellos, seleccionar la opción TRACKBALL y rotar el mapa.



17. Verificar los comandos marcados en la siguiente figura y listo.

