GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

ANÁLISIS Y APLICACIÓN METODOLOGÍA PARA LA DELIMITACIÓN Y SECTORIZACIÓN DE ACUÍFEROS EN LA PROVINCIA DE ÑUBLE, VIII REGIÓN

REALIZADO POR:
SUBTERRÁNEA SpA

S.I.T. N°377

SANTIAGO, OCTUBRE, 2015

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe de División de Estudios y Planificación
Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Sr. Juan Carlos Salgado González

Inspector Fiscal (S)
Sr. Raúl Cisternas Novoa

Subterránea SpA

Jefe de Proyecto
Igor Aguirre
Hidrogeólogo-Geofísico

Profesionales:
Geofísico Gonzalo Yáñez
Geofísico Elías Lira
Ingeniero Civil José Maringue
Cartógrafo Luis Acevedo
Hidrogeólogo Isabel Santibáñez

ÍNDICE

Pág.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS 1
1.1. INTRODUCCIÓN 1
1.2. OBJETIVOS 1
1.2.1. Objetivo General 2
1.2.2. Objetivos Específicos 2
1.3. ALCANCES 2
1.4. ACTIVIDADES Y ETAPAS DEL ESTUDIO 2
1.4.1. Etapa I 3
1.4.2. Etapa II 3
1.5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA 4
1.6. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO 5
1.7. CONDICIONES CLIMÁTICAS GENERALES 6
2. REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE ANTECEDENTES 7
2.1. LABORES REALIZADAS 7
2.2. ESTUDIOS O INFORMACIÓN RECOPILADA 7
2.3. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA METODOLOGÍA 12
3. ESTUDIO GEOFÍSICO 17
4. SECTORIZACIÓN ACUÍFERA 20
4.1. IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 20
4.2. BASE TOPOGRÁFICA 21
4.3. RED DE DRENAJE 23
4.4. SUBCUENCAS (SECTORIZACIÓN PRELIMINAR) 24
4.5. HIDROGEOLOGÍA 26
4.5.1. Geología 26
4.5.2. Captaciones de agua subterránea y profundidad del agua subterránea 27
4.5.3. Unidades Hidrogeológicas y dirección de flujo del agua subterránea 29
4.5.4. Unidades acuíferas y su distribución espacial 31
4.5.5. Parámetros elásticos 32
4.6. FACTORES COMPLEMENTARIOS 33
4.7. SECTORIZACIÓN DEFINITIVA 34
4.8. VÍNCULOS O CONEXIONES 36
4.9. PROYECTO SIG 37
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 39
6. BIBLIOGRAFÍA 41

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Vértices de la zona de estudio que contiene área acordada 21
Tabla 2. Sectores acuíferos y sus características más relevantes. 36
Tabla 3. Resumen de los pasos realizados para sectorización con indicación de las coberturas feature class de ArcGIS que respaldan el estudio..... 38

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Área de estudio generalizada, en rojo se muestran subcuencas de referencia. .. 5
Figura 2. Climatograma Estación Meteorológica Chillán, representativa para el área de estudio (CADE-IDEPE, 2004) 6
Figura 3. Resumen de la interpretación geofísica de la profundidad de Basamento a partir de una combinación de estudio TEM y de gravimetría (puntos en color amarillo, este estudio, y puntos en color naranja, estudio de Aquaterra (2011) 18
Figura 4. Zona de estudio (área con puntos color violeta) y polígono (área color rojo) con vértices de la zona que contiene 21
Figura 5. Base Topográfica con red de drenaje 22
Figura 6. Red de drenaje y subcuencas principales según Mapoteca DGA 24
Figura 7. Subcuencas de drenaje e hidrografía con denominación sobre el DEM 25
Figura 8. Mapa Geológico del área de estudio 27
Figura 9. Localización de captaciones subterráneas (puntos color negro), solicitudes de derecho en trámite (puntos de colores) y profundidad del agua subterránea. 28
Figura 10. Mapa hidrogeológico y en color violeta isopiezas (msnm)..... 29
Figura 11. Mapa de profundidad del basamento (valores en metros) 31
Figura 12. Mapa de isovalores de transmisividad (m^2/día) y localización de pozos 33
Figura 13. Sectorización definitiva (polígonos color amarillo) y vínculos (flechas color blanco) y límites de las cuencas elaboradas en este informe (líneas color negro) 35

ANEXOS

Pág.

ANEXO N°1. LEVANTAMIENTO GEOFÍSICO DE TRANSIENTE ELECTROMAGNÉTICO Y GRAVIMETRÍA PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SECTORIZACIÓN DEL ACUÍFERO DEL RÍO ÑUBLE 43

1. INTRODUCCIÓN 1
2. TRANSIENTE ELECTROMAGNÉTICO (TEM) 2
   2.1. TRABAJO DE TERRENO 2
      2.1.1. Instrumentación y loop utilizado 3
      2.1.2. Generalidades del método TEM 3
   2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS 4
      2.2.1. Ubicación 4
      2.2.2. Reducción de datos 4
      2.2.3. Modelamiento 5
3. GRAVIMETRÍA 15
   3.1. TRABAJO DE TERRENO 15
      3.1.1. Instrumentación utilizada 15
      3.1.2. Generalidades del método gravimétrico 15
   3.2. PROCESAMIENTO DE DATOS 16
      3.2.1. Ubicación 16
      3.2.2. Reducción de datos 19
      3.2.3. Modelamiento 23
4. INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS RESULTADOS 26

ANEXO N°2. RESPALDO DIGITAL 30

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las principales funciones que tiene la DGA está el estudio continuo de las fuentes de recursos hídricos, lo anterior con el principal objetivo de que sean aprovechados por el país de manera sustentable hoy y en el futuro.

Dado que en Chile existen numerosas cuencas donde las fuentes de aguas superficiales se encuentran agotadas o se encuentran en camino de estarlo, y por tanto se prevé un alza en la solicitud derechos subterráneos en ellas, es que se requiere disponer de una adecuada sectorización y delimitación de sus respectivos sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común para así mejorar la gestión de los recursos hídricos. Por esta razón, durante el año 2014, la DGA desarrolló una metodología modular para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional. Para lo anterior, deben seguirse una serie de pasos correlativos que permiten generar un producto individual para continuar al siguiente paso hasta lograr una sectorización del acuífero. Esta metodología fue validada a través de su aplicación en dos cuencas piloto.

De esta forma, el objetivo planteado para el presente estudio es realizar un análisis crítico de la metodología de sectorización acuífera, complementándola en caso de ser necesaria y aplicándola al sector de Ñuble. Originalmente se planteó focalizar el estudio en un área cercana al estero Changaral (Imágenes Licitación 1019-53-LE15). Posteriormente, como resultado de los avances en la ejecución de la Etapa 1 de este estudio, y en acuerdo con la Inspección Fiscal de la DGA, el área de sectorización definitiva fue ajustada de acuerdo a los antecedentes presentados en este estudio.

El presente documento corresponde al Informe Final del trabajo.

1.2. OBJETIVOS

A continuación se indican los objetivos del presente estudio.

1.2.1. Objetivo General

- El objetivo general de este estudio es analizar y aplicar la metodología de delimitación y sectorización de acuíferos en el acuífero de Ñuble, cercano al estero Changaral.
- Realizar un levantamiento de terreno mediante técnicas geofísicas en al menos 70 estaciones TEM y 70 estaciones Gravimétricas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis crítico y complementar, en caso sea necesario, la metodología de delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional desarrollada en 2014 por Guillermo Cabrera para la DGA.
- Aplicar la metodología en la cuenca del río Ñuble, en el sector del estero Changaral, VIII Región.

Se debe destacar que, sobre la base de información hidrogeológica relevante y en acuerdo con la Inspección Fiscal, se decidió enfocar la sectorización definitiva al interior de un área que concentra la mayor cantidad de solicitudes de derechos de agua por resolver. De esta manera se aprovechará de mejor forma la información geofísica a generar en el presente estudio.

1.3. ALCANCES

El estudio abarca al acuífero subyacente a la zona de estudio. Su delimitación se ajustará a la metodología para la delimitación de acuíferos desarrollada en el informe SIT N° 341 de Octubre de 2014. Se incluyen algunas modificaciones y/o especificaciones adicionales a esta metodología que contribuyan a establecer una adecuada delimitación acuífera para la correcta administración de los recursos hídricos en el área seleccionada. Como producto de este trabajo se dispondrá de una sectorización del acuífero de interés.

De esta forma, los alcances del estudio corresponden al análisis crítico y aplicación en gabinete de la metodología de delimitación y sectorización de acuíferos, utilizando información recopilada a partir de antecedentes existentes, trabajos geofísicos, y la información generada durante el presente estudio. Para lo anterior, se desarrollarán actividades tanto en terreno como en oficina.

1.4. ACTIVIDADES Y ETAPAS DEL ESTUDIO

El estudio, originalmente se planteó desarrollar según las actividades descritas en las Bases de Licitación. Sin embargo, en estas mismas Bases se indica que dichas actividades podrían requerir ajustes metodológicos producto del propio desarrollo del estudio o actividades no previstas al momento de confeccionar las bases técnicas, tanto por solicitud de la presente consultoría como de la Inspección Fiscal, así como también se podrían desarrollar actividades de forma paralela o no necesariamente en el orden establecido en las Bases. Es así como, luego de analizar los intereses de la DGA para con este estudio y a partir de acuerdos consensuados con la Inspección Fiscal, se realizaron los ajustes necesarios, los permitieron ajustar la ejecución de las actividades definitivas desarrolladas en cada Etapa

(I y II) de este estudio.

1.4.1. Etapa I

1.4.1.1. Análisis crítico de la metodología

Corresponde a un análisis crítico de la metodología desarrollada en el estudio S.I.T. N° 341. De este análisis se desprendieron las tareas necesarias para su complementación, mejora y/o simplificación.

1.4.1.2. Recopilación de información

Correspondió a una recopilación exhaustiva de la información necesaria para sectorizar el acuífero según los pasos propuestos en el estudio S.I.T. N° 341. Esto incluyo toda la información necesaria o complementaria para el desarrollo del presente trabajo.

1.4.1.3. Aplicación de la metodología

Consistió en la aplicación de la metodología. Cada paso de los procedimientos y etapas planteadas en el estudio S.I.T. N° 341 fueron explicados consecutivamente, y en caso de ser necesario se retroalimentó o mejoró este criterio metodológico a la luz de los resultados de su aplicación.

1.4.1.4. Definición de las áreas dónde ejecutar la campaña de prospección geofísica

Una vez recopilada toda la información relevante y definida el área de sectorización, se propusieron las áreas para realización de una campaña de prospección geofísica, utilizando el método TEM o uno equivalente y gravimetría. De acuerdo a las Bases de Licitación se debían ejecutar un total de al menos 70 estaciones gravimétricas y 70 estaciones TEM o equivalente. Sin embargo, para el presente estudio se realizaron muchas más estaciones tanto de estaciones TEM como de estaciones gravimétricas.

1.4.2. Etapa II

1.4.2.1. Campaña de prospección geofísica

La campaña de prospección geofísica se ejecutó en el área seleccionada para la sectorización definitiva. Esto, con el objeto de optimizar los recursos disponibles para una mejor estimación de la recarga y descarga a partir de una mejor definición hidrogeológica de la sección acuífera de entrada y salida del área a sectorizar en detalle.

Se planteó ejecutar la gravimetría y el levantamiento de estaciones TEM o método equivalente con el objeto de alcanzar profundidades de investigación mayores a 100 m, idealmente del orden de 200-300 m de profundidad. El tamaño de loop considerado para las estaciones TEM es de 200 x 200 metros o

equivalente. El centro del loop se plantea sea coincidente con la ubicación de las estaciones gravimétricas. La posición de las estaciones gravimétricas fue registrada con GPS diferencial.

1.4.2.2. Aplicación de la metodología

Esta tarea consistió en la aplicación de la metodología del estudio S.I.T. N° 341. Cada paso de los procedimientos y etapas son explicados, y en caso necesario se retroalimentó o mejoró la metodología propuesta a la luz de los resultados de su aplicación en el presente estudio.

1.4.2.3. Representación de los acuíferos a través de SIG

El resultado de los acuíferos delimitados y su correspondiente sectorización será entregado como capas operativas del SIG. Esto quiere decir que debe ser una capa o Layer, con una base de datos asociada.

1.4.2.4. Conclusiones e Informe Final

Como parte final se entrega el informe final, con los resultados y principales conclusiones del estudio.

1.5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El presente análisis se centra en la cuenca del río Ñuble en donde se concentra la mayor cantidad de solicitudes de derechos de agua sin resolver. Las comunas abarcadas son Bulnes, Chillán, Chillán Viejo, Ninhue, Pinto, Portezuelo, San Carlos, San Ignacio y San Nicolás. El área de estudio generalizada propuesta en las bases de licitación se muestra en la siguiente figura (Figura 1).

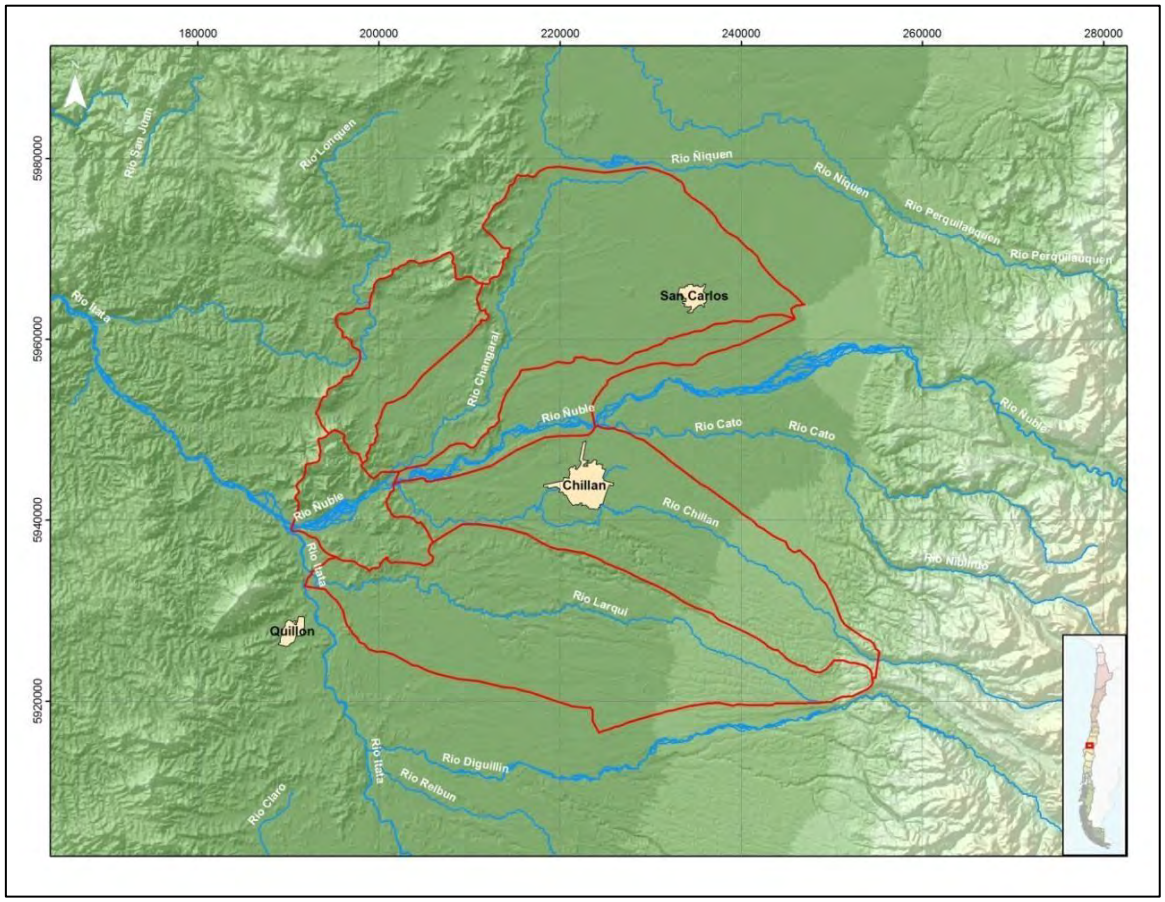


Figura 1. Área de estudio generalizada, en rojo se muestran subcuencas de referencia.

1.6. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

La zona de estudio se caracteriza por presentar rocas sedimentarias del Pleistoceno-Holoceno, depósitos aluviales a coluviales y depósitos de remoción en masa; y en menor proporción depósitos fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. También se observan rocas volcánicas del Pleistoceno y depósitos piroclásticos principalmente riolíticos asociados a calderas de colapso; y rocas volcánicas del Cuaternario, depósitos de avalancha volcánica asociados a colapso parcial de edificios volcánicos.

Hidrogeológicamente se considera existe una gran masa de agua subterránea que se encuentra en la depresión intermedia, esta zona se caracteriza por tener una elevada productividad de los pozos (1 − 4 m^3/h/m). Destaca en esta zona la baja profundidad del acuífero, registrándose zonas de surgencia así como formación de esteros y ríos que nacen en esta zona.

1.7. CONDICIONES CLIMÁTICAS GENERALES

Esta zona se encuentra bajo la influencia de un bioclima mediterráneo y presenta al menos dos meses consecutivos del período estival con déficit hídrico.

El patrón de variación ombroclimática es el característico para la zona centro sur de Chile: las precipitaciones tienden a ser mayores al oeste de ambas cordilleras, pues ellas ejercen un efecto de barrera para los frentes húmedos que se aproximan al continente desde el Océano Pacífico, diferenciándose sectores de ombroclima húmedo y subhúmedo, con montos de precipitación que varían en torno a los 1.000 [mm] anuales. Sobre la base del régimen pluviométrico y térmico, se distinguen dos tipos bioclimáticos:

- Mediterráneo pluviestacional - oceánico, que influye en casi toda el área de la cuenca, en que la amplitud térmica anual es inferior a 20 °C.
- Mediterráneo pluviestacional – continental, en los pocos sectores en que la altitud se eleva por sobre los 2.000 [m.s.n.m.], donde (por efecto de la altitud) la amplitud térmica anual suele ser superior a 20°C.

La Estación Meteorológica Chillán registra una temperatura promedio anual de 14,08 °C, con una mínima de 7,60 °C y una máxima de 20,56 °C. La precipitación promedio es de 85,43 [mm] y el total anual de agua caída es de 1.025,2 [mm]. En la Figura 2, se presentan los montos de precipitación y temperaturas medias mensuales registradas por la Estación Meteorológica de Chillán.

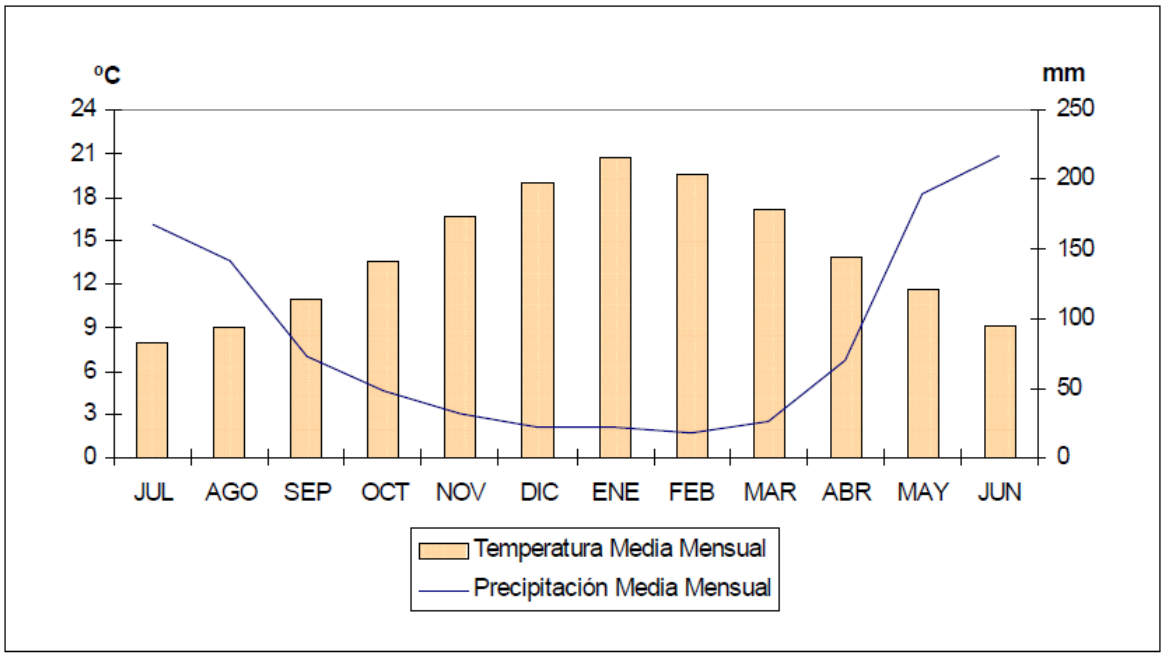


Figura 2. Climatograma Estación Meteorológica Chillán, representativa para el área de estudio (CADE-IDEPE, 2004).

2. REVISIÓN Y ANÁLISIS CRITICO DE ANTECEDENTES

2.1. LABORES REALIZADAS

Durante la Etapa I se realizó una búsqueda y recopilación de información y antecedentes, la cual y para efectos de presentación y claridad se dividió en dos áreas:

La primera se centró en buscar estudios relacionados a las materias de interés de la presente consultoría, desarrollados tanto por entidades públicas como privadas.

La segunda fue la recopilación de antecedentes técnicos de pozos o sondajes construidos en el área en estudio, incluidos en las carpetas de los expedientes de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.

En los puntos siguientes se describen las labores y principales resultados obtenidos durante el desarrollo de estas tareas.

2.2. ESTUDIOS O INFORMACIÓN RECOPILADA

A continuación se señalan los principales estudios analizados, los que incluyen numerosa información de base.

REF 1. ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO CUENCAS BÍO BÍO E ITATA. CUENCA ITATA. TOMO I, INFORME FINAL. REALIZADO POR: AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA. S.I.T Nº 258.

El objetivo del estudio fue elaborar un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de la cuenca del río Itata. Se obtuvo información técnica de los expedientes (plano de construcción del pozo, prueba de gasto constante y/o variable, etc.) para un total de 442 sondajes. Este estudio incluye una caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Itata, efectuada sobre la base de estadísticas pluviométricas y fluviométricas analizando la calidad y extensión de los registros de precipitaciones mensuales y caudales medios mensuales, rellenando estadísticas incompletas y efectuando un análisis de frecuencia analítico a nivel mensual para obtener una distribución de valores con diferentes probabilidades de excedencia.

El estudio incorpora una caracterización geológica (1:250.000) y geomorfológica de la cuenca del río Itata, con un plano geológico y uno de acuíferos, según tipo de relleno. Presenta una definición y descripción de las unidades hidrogeológicas presentes en la cuenca, en base a la información recopilada e interpretada a partir de 286 perfiles estratigráficos de pozos. Se establece así el predominio de una gran unidad hidrogeológica con variaciones de permeabilidad laterales y en profundidad con dos subunidades denominadas Unidad A (sectores de mediana a alta permeabilidad) y Unidad B (sectores de permeabilidad media a baja). Concluye que las permeabilidades de este

sistema acuífero son regulares a bajas, debido al predominio de depósitos morrenicos y glaciolacustres. Sin embargo, estos afloran hacia el oriente de la zona de estudio, y hacia el occidente del área de estudio afloran areniscas, limonitas y depósitos fluviales que atraviesan toda el área.

El estudio presenta un levantamiento geofísico con 353 estaciones gravimétricas (9 perfiles), a partir del cual se deducen profundidades de roca muy variables, entre los 50 m y los 1900 m (sector norte del río Ñuble) y entre 500 y 1000 m (valle central). Debido a los grandes espesores de rellenos deducidos a partir de esta gravimetría (> 500 m) recomiendan la perforación de cuatro sondajes profundos de unos 300 m y el levantamiento de 120 estaciones geofísicas tipo TEM con loop 200x200 para así definir en profundidad las características hidrogeológicas del acuífero. Sin embargo, no se proponen ubicaciones específicas para estos levantamientos y no se explica el por qué se propone solo TEM, restringiendo con ello las posibilidades de exploración del acuífero sólo al método TEM, existiendo alternativas en cuanto a un loop más pequeño o la aplicación de otras metodologías geofísicas como los Sondeos Eléctricos Verticales, entre otros posibles.

Presenta valores de mediciones de niveles estáticos efectuadas durante Agosto del año 2011 en 204 pozos profundos, con la que se elaboran curvas isofreáticas, perfiles estratigráficos y valores de transmisibilidad (de 115 pruebas de bombeo documentadas en los expedientes DGA) junto con la localización de posibles sectores de afloramiento y/o recuperaciones en algunos tramos de los ríos Ñuble, Cato, Chillán, Itata y Diguillín. Cabe indicar que si bien existen mediciones (aforos) efectuadas en los cauces principales antes indicados y que confirman las recuperaciones, es probable que parte de estos afloramientos provengan desde sus afluentes. Recomiendan desarrollar campañas de aforo, en los cauces antes señalados y sus afluentes, con el objeto de delimitar y cuantificar este fenómeno con mayor precisión, de tal modo de incorporar esta variable en futuras modelaciones superficiales y subterráneas.

Proponen un valor de 0,27 l/s/ha para la recarga al acuífero en la cuenca del Itata, establecido a partir de un modelo de simulación hidrológico simplificado proveniente desde los diferentes elementos superficiales (cauces, sectores de riego y otros). Se recomienda implementar un modelo detallado que permita estimar en base a datos actualizados (superficies de riego, patrones de cultivos, frecuencias de bombeo, etc.) la variabilidad estacional y los valores de recarga desde los distintos componentes a considerar (cauces, embalses, sectores de riego, sectores secano, etc.).

Las características geológicas del área considerada en el estudio gravimétrico son homogéneas para toda el área. Los resultados y profundidades asumidas en este estudio podrían fluctuar dependiendo del contraste de densidad a utilizar. Al parecer, de acuerdo al estudio, la potencia de este acuífero supera los 150 m, sin embargo no existe información que permita asegurar cuáles son las características litológicas o sedimentológicas profundas. En el presente estudio se revisará en detalle las densidades factibles de usar para el área sectorizada, pudiendo cambiar el resultado del basamento o roca. La gravimetría ejecutada sólo indica que el espesor de los rellenos puede ser en algunos sectores superior a 500 m.

Un antecedente relevante para la sectorización a desarrollar lo conforman las curvas isofreáticas elaboradas en el estudio de Aquaterra (2011). Esto permitirá delimitar subterráneamente la cuenca de estudio. Sin embargo, se debe tener presente que este límite puede sufrir cambios debido a la intensidad de explotación del acuífero en las cuencas hidrogeológicas vecinas. Es por ello que esta delimitación debe quedar abierta a una revisión en el futuro, a partir de antecedentes de monitoreo de los niveles de la napa. Para estas áreas se propone establecer Vínculos, de acuerdo a la metodología señalada por Cabrera (2014). Adicionalmente se destaca la facilidad de la aplicación de la metodología de sectorización de acuífero dado que el estudio de Aquaterra (2011) presenta toda la información elaborada y mencionada en los párrafos anteriores en formato ArcGIS (9.2).

REF 2. MANUAL DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA DELIMITACIÓN Y SECTORIZACIÓN DE ACUÍFEROS. S.I.T. N° 341. GCF INGENIEROS LTDA.

Este manual propone una secuencia de pasos a seguir para la delimitación y sectorización de acuíferos en Chile. El objetivo fue generar una metodología de carácter científico técnico y de aplicación institucional para delimitar acuíferos y sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común. Esto se realizó mediante una revisión de antecedentes que permitieran determinar cuáles son los principales criterios utilizados para delimitar y sectorizar acuíferos, tanto a nivel nacional como internacional.

El nivel de detalle y precisión resultante de la sectorización así definida dependerá directamente de la cantidad y calidad de la información base que se utilice en el proceso.

Se destaca de esta metodología la facilidad de manejo de la información existente y de aquella a generar, por cuanto al homogeneizar los datos disponibles en una plataforma única, como ocurre a través de una interface SIG, se permite, con la información disponible, establecer la sectorización definitiva. Para ello, los datos deben ser uniformados como archivos shapes del software ArcGIS, no obstante también es posible que la información se pueda presentar como planos AutoCAD, teniendo en cuenta las limitaciones relacionadas con la base de datos. Se destaca que en ArcGIS la base de datos va integrada a cada elemento vectorial (archivo *.dbf) y en AutoCAD, ésta se debe agregar con llamados o tablas explícitas.

Se debe tener presente que al ser esta una metodología reciente es posible se puedan incorporar nuevos criterios dependiendo de la información disponible y la relevancia de los antecedentes.

A continuación se indican las etapas a ejecutar para la aplicación y desarrollo de esta metodología:

(1) Definición o Identificación de la Zona de Estudio.
(2) Base Topográfica.
(3) Definición de la Red de Drenaje.
(4) Sectorización Preliminar según Subcuencas.
(5) Representación Hidrogeológica.

(6) Parámetros Elásticos.
(7) Captaciones de Agua Subterránea.
(8) Sectorización Definitiva.
(9) Factores Complementarios Zonas Sensibles o Protegidas.
(10) Vínculos.
(11) Proyecto SIG y Respaldo Digital.

Más adelante se realiza un análisis crítico a esta metodología y sus respectivas etapas o pasos.

REF. 3 INFORMACIÓN DE POZOS

a) Derechos de Agua.

Consultada la DGA respecto de información actualizada referida a la situación de los Derechos de Agua en la zona estudio, el Centro de Información de Recursos Hídricos de la DGA entregó un archivo Excel (nd 4 y 6 de la VIII region_001.xls) con la información de Derechos de Agua de la VIII Región. Este archivo incorpora información de 6392 pozos, de los cuales solo 4685 pozos presentan coordenadas. Se estandarizó la localización y se generaron dos columnas nuevas con información de la localización de los pozos en UTM WGS84-19S (Norte y Este). La información presentada en éste catastro se titula "Información General de Aguas Subterráneas", e incluye el siguiente detalle de antecedentes:

- N° de Expediente: Indica el número de expediente de cada solicitud
- Nombre Solicitante. Señala el nombre del solicitante del derecho.
- Ing. Trámite. Fecha de ingreso de la solicitud a trámite.
- Comuna. Comuna.
- Tipo y Ejer. Se refiere al Tipo de Derecho (Consuntivo (C) o No Consuntivo (NC)) y al Ejercicio de éste presentando las siguientes alternativas: Permanente y Continuo (P/C), Permanente y Discontinuo (P/D), Permanente y Alternado (P/A), Eventual y Continuo (E/C), Eventual y Discontinuo (E/D), Eventual y Alternado (E/A), Permanente y Continuo y Provisionales (P/C/Pr), Permanente y Discontinuo y Provisionales (P/D/Pr), Permanente y Alternado y Provisionales (P/A/Pr), Eventual y Continuo y Provisionales (E/C/Pr), Eventual y Discontinuo y Provisionales (E/D/Pr), Eventual y Alternado y Provisionales (E/A/Pr).
- Nat. Naturaleza del Agua: Superficial o Subterránea.
- Nombre acuífero. Este Campo está vacío.
- QSol. Caudal solicitado.
- UnSol. Unidad de medida del caudal solicitado (lt/s).
- Edo. La columna presenta espacios vacíos, o las letras P/C, o simplemente un asterisco (*).
- Ubicación Sol (m). El archivo incluye información de los derechos de agua solicitados, otorgados y en trámite. La información se presenta en Lat-Long en PSAD-56 y en UTM Datum PSAD-56 y WGS-84 y husos 18S y 19S.
- Tipo coord. Tipo de coordenadas rellena con los campos OFI, SOL, REF.
- Sist. Act. Situación actual del derecho, con las siguientes alternativas: Pendiente en Región (P-REG), Pendiente en DARH (P-DARH), Aprobado (A), Aprobado con

recurso reconsideración (A-RR), Aprobado con recurso reclamación (A-RRCL), Denegado (D), Denegado con recurso reconsideración (D-RR), Denegado con recurso reclamación (D-RRCL), Renuncia o Caducidad (C), Renuncia o Caducidad con recurso reconsideración (C-RR), Renuncia o Caducidad con recurso reclamación (DES), Desiste Solicitud (DES), Desiste Solicitud con recurso reconsideración (DES-RR), Desiste Solicitud con recurso reclamación (DES-RRCL).

- N° Res F.T. Este campo indica, cuando existe, el número de la resolución.
- F.Res. Indica fecha de la Resolución.
- F.T. Razón. Indica fecha de la toma de razón.
- Uso. Este campo, presenta gran cantidad de vacíos, indicándose para algunos casos la sigla R o la sigla OU.
- Origen Sol. Este campo, presenta gran cantidad de vacíos, indicándose para algunos casos INDAP, 4T o 6T.

Uno de los estudios que se revisó, pero que finalmente no se utilizó en la sectorización fue el documento denominado "Vulnerabilidad a la Contaminación de los Acuíferos de la Región del Biobío" (Aguirre, et. al., 2004). El estudio muestra una zonificación del territorio basada en factores hidrogeológicos característicos del acuífero y de la zona no saturada, que dan cuenta de la sensibilidad del sistema de aguas subterráneas de absorber alguna alteración frente a impactos humanos o naturales. Se determinan diversos rangos de vulnerabilidad a través de una cartografía a escala 1:250.000 y de acuerdo a ello se proponen recomendaciones para los instrumentos de planificación territorial y el manejo sustentable del agua subterránea. En términos prácticos, se proponen diversas acciones de acuerdo al tipo de proyecto a desarrollar y la valoración de vulnerabilidad que éste posee. Se consideró que el foco de esta zonificación, basada principalmente en características de la zona no saturada, no era relevante para la metodología de sectorización acuífera propuesta por Cabrera (2014).

b) Antecedentes Estratigráficos de Pozos

Se solicitó a la DGA información de pozos profundos para la zona, y se obtuvo información de 7 pozos de propiedad de la empresa ESBIO. La profundidad de estos pozos fluctúa entre 107 m y 210 m, que incluyen descripciones de pozos de diversa calidad. Sin embargo, solo dos de estos pozos presentan coordenadas UTM, y en uno de ellos no se indica Datum ni huso. Adicionalmente se consultó a la DGA por estratigrafía de pozos cercana a los puntos donde se realizó el levantamiento TEM. Para una mejor interpretación de los perfiles de TEM, se seleccionaron pozos e información estratigráfica en torno a las localizaciones de los puntos donde se efectuó el levantamiento geofísico.

REF 4. ESTUDIO GEOFÍSICO DE TRANSIENTE ELECTROMAGNÉTICO (TEM) PARA MODELO DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO PARA USO AGROPECUARIO. REALIZADO POR TRV, 2013. ESTUDIO REALIZADO PARA INFORME ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO. PROYECTO INNOVA CORFO COD. 12BPC2-13473. ETAPA I – DESARROLLO DEL BIEN PÚBLICO. "CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO Y PROPUESTAS DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN". INH (2014).

Este levantamiento de antecedentes geofísicos se concentra en torno al sector de San Carlos y fue realizado en el contexto de un estudio hidrogeológico ejecutado por el

Instituto Nacional de Hidráulica (INH, 2014). Presenta datos de 154 estaciones TEM agrupados en 5 perfiles geoeléctricos con estaciones TEM separadas cada 150 m aproximadamente. El levantamiento se realizó entre marzo y mayo del año 2013 con equipo PROPTEM y un loop central de 200x200 m, estimándose inicialmente 400 m como profundidad de investigación. En los resultados no todos los perfiles muestran esta profundidad y debido a las limitaciones del método con el loop así definido, los primeros 30-40 m no se resuelven adecuadamente, lo que en parte explicaría que algunos perfiles geoeléctricos muestran una superposición con un gran contraste de valores de resistividad.

Los perfiles geoléctricos se presentan como secciones 2D de resistividad versus profundidad, indicando sus autores que presentan similar distribución de los valores de resistividad con la profundidad. La interpretación hidrogeológica de estos perfiles geoeléctricos se basó principalmente en la sección de resistividad de la línea o perfil geoeléctrico 2. A continuación se sintetiza la interpretación hidrogeológica realizada por este estudio.

- Capa de sedimentos superficiales: capa más superficial, en todas las líneas estudiadas, con un espesor de aproximadamente 30 metros y valores de resistividad de 30 a 600 ohm-m, interpretados como sedimentos compuestos por grava, arcillas y arena, los cuales estarían poco saturadas con agua y predominarían las arcillas por sobre las arenas.

- Capa permeable saturada con agua, acuífero. Capa bajo la primera capa de sedimentos con valores bajos de resistividad, entre 5 y 30 ohm-m. En esta capa se encontraría un acuífero confinado. Su espesor es de aproximadamente 20 metros de gravas + arenas +/- arcillas saturados con agua. Los autores del estudio señalan que las arenas deben estar en un mayor porcentaje que las arcillas y que sería la razón de la permeabilidad.

- Capa de sedimentos con predominio de arcillas, saturada de agua: Bajo la capa permeable descrita en el punto anterior, señalan una capa de sedimentos de espesor variable, que indican puede llegar hasta los 100 metros, con valores de resistividad que desde los 30 a 60 ohm-m. Los autores señalan que este leve aumento en los valores de resistividad se debe a que habría más arcillas que arenas.

- Capa permeable saturada con agua: Esta capa de sedimentos (gravas + arenas + arcillas) detectada bajo la capa con predominación de arcillas por sobre las arenas. El espesor de los sedimentos puede alcanzar más de 100 metros. Sedimentos con bajos valores de resistividad, de 5 a 30 ohm-m, de composición similar a los sedimentos de la capa acuífero superficial, es decir, gravas + arenas +/- arcillas con el contenido de arenas superior al contenido de arcillas.

2.3. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA METODOLOGÍA

La Dirección General de Aguas tiene entre sus principales funciones, el estudio continuo de las fuentes de agua, con el objetivo de lograr un aprovechamiento sustentable de dichos recursos hídricos. Además, utilizando como marco legal lo establecido en el Código de Aguas y en el Reglamento de Aguas Subterráneas, debe gestionar las solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas, para ya sea constituirlas como derechos definitivos o provisionales, o denegarlas en mérito de los antecedentes administrativos, técnicos y legales correspondientes.

Un elemento fundamental que se ha utilizado en los procedimientos para otorgar derechos de aprovechamiento ha sido el "Sector hidrogeológico de aprovechamiento común", que ha sido definido en el Reglamento de Aguas Subterráneas (Decreto Nº203 de 2013) como "el acuífero o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente".

El conocimiento de los sistemas acuíferos en el país, si bien ha sido creciente, no ha ido a la par con el aumento sostenido de la demanda por derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, lo que ha motivado la necesidad de disponer de una metodología que permita delimitar acuíferos o sectores acuíferos, que incluya una interpretación práctica del sector hidrogeológico de aprovechamiento común, y que considere los aspectos tanto legales, como técnicos y administrativos que se deriven de su aplicación.

La metodología propuesta por el estudio S.I.T. N° 341 busca ser clara y relativamente fácil de aplicar en las cuencas de Chile. Sin embargo, en la práctica, surgen dudas o flexibilidades que se podrían acotar de mejor forma proponiendo procedimientos más detallados, complementarios o específicos. En el apéndice del estudio S.I.T. N° 341 se presentan dos casos de aplicación, que corresponde al de la cuenca de los esteros Culebrón y Lagunillas (Pan de Azúcar), de la IV Región. Por ejemplo, en estos casos, no se detallan los criterios utilizados para la selección de los límites entre subcuencas hidrográficas y por otro lado la definición de sectorizaciones a partir de información química localizada en sectores puntuales podría generar una delimitación errónea a la luz de nuevos antecedentes de sondajes o pozos, o referidos a eventuales variaciones químicas del agua subterránea en sentido vertical. Lo anterior podría ser extensible a cualquier tipo de dato puntual o areal y restringido espacialmente (por ej. parámetros elásticos, niveles estáticos, información geológica y de pozos, etc.).

A pesar de lo anterior, la aplicación de esta metodología tiene por objetivo uniformar y actualizar los criterios técnicos que utiliza la Dirección General de Aguas en el ámbito de la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional, de forma de disponer de mejores argumentos técnicos que justifiquen la toma de decisiones en el marco de la administración de los recursos hídricos.

A continuación, y de acuerdo a lo solicitado por la DGA, se realizan comentarios críticos específicos a cada etapa de aplicación de esta metodología.

Respecto de la definición o identificación de la Zona de Estudio, la metodología propone identificar el área de estudio mediante un polígono que la contenga la zona de estudio, definido por las coordenadas UTM de sus vértices (Datum SIRGAS o WGS84). Sin embargo,

no se establecen criterios de distancias mínimas entre este polígono y las cuencas hidrográficas que incluyen el área de interés. Adicionalmente, con el fin de reconocer visualmente el área de interés, podría mejorarse esta caracterización incluyendo una imagen satelital o fotografía aérea que dé cuenta del aspecto del área de interés. Dado que la metodología está orientada a ser aplicada por la DGA esencialmente, se debieran indicar cuáles son los criterios relevantes para definir esta zona de interés. En este sentido, para la DGA es de gran interés resolver la asignación de caudales asociados a derechos de agua en trámite utilizando como criterio la disponibilidad del recurso (cantidad y/o calidad).

Respecto de la Base Topográfica, la metodología propone disponer de una base topográfica para el área de estudio pudiendo ser esta las curvas de nivel del IGM, topografía satelital SRTM2 o ASTER3, levantamientos topográficos de detalle, etc. No obstante, a pesar que en la metodología de sectorización se señalan escalas de trabajo, para mayor claridad se recomienda especificar con mayor detalle la escala de esta topografía respecto de las dimensiones y/o contrastes de altitud del área a sectorizar. Por otro lado, el sensor Aster, los modelos SRTM o los GDEM, son una excelente herramienta y de libre acceso, que permiten obtener información altimétrica de una zona determinada, pero también es válido utilizar información proporcionada por IGM, sobre todo en zonas planas, donde no existe una topografía abrupta que permita controlar por ejemplo flujos superficiales o delimitar cuencas de manera automática. Adicionalmente, se señala que con la base cartográfica o topográfica se debe construir un plano de planta del área de estudio, en el cual la sectorización acuífera a desarrollar abarque al menos las zonas planas, valles y rellenos contenidos en la cuenca o zona de estudio. Sin embargo, también es relevante el proponer hasta qué extensión de rocas se incluye en esta topografía, especialmente en zonas rocosas que pudieran contener acuíferos.

La metodología señala que se debe definir la Red de Drenaje. Sobre el plano de planta del área de estudio, generado en el punto anterior, se debe indicar que el producto que se ha de generar en esta etapa es una red de drenaje elaborada con la topografía y que en caso de estimarse necesario, se mejorará o complementará. Lo anterior mediante información disponible de la cartografía IGM, con levantamientos topográficos de detalle o utilizando imágenes satelitales de mayor resolución. Se proponen efectuar el trazado de la red de drenaje con ArcGIS (Spatial Analyst Tools, Hydrology, Flow direction y Flow accumulation) o con algún programa específico para este proceso como WMS, por ejemplo. A pesar de ello, en términos prácticos el recurrir a estas herramientas puede complicar aún más el proceso, no quedando muy claro cuándo o con qué criterios de cierre es relevante aplicar esta técnica. Además, muchas veces la resolución de la hidrografía disponible puede ser mucho mejor que la generada por la topografía disponible.

La sectorización preliminar según subcuencas, de acuerdo a la metodología, se propone efectuarla a partir del plano de planta, con la base topográfica y la red de drenaje elaboradas en los pasos anteriores. Esto permite generar, en este caso, las subcuencas de drenaje superficial. Es relevante definir con mayor detalle los criterios de corte de cada una de estas subcuencas, pudiendo ser por tamaño, antecedentes geológicos como localización de los límites de unidades de roca o depósitos permeables v/s impermeables, zonificación de acuíferos o acuífugos, etc. Así mismo, para la DGA será de interés considerar subcuencas hidrográficas que permitan agrupar criterios de interés

administrativo, como por ejemplo los derechos de agua o intensidad de su explotación. Para delimitar las subcuencas el método recomienda usar un programa específico (como WMS) o ArcGIS (usando los comandos de Spatial Analyst Tools-Hydrology). Sin embargo, en términos prácticos el recurrir a estas herramientas puede complicar aún más el proceso, no quedando muy claro cuándo o con qué criterios de cierre es relevante aplicar esta técnica. Por otro lado, la sectorización pretende contribuir a la definición de sectores acuíferos, por tanto el foco debiera establecerse en definir áreas de recarga para estos acuíferos, que en general coinciden con los límites de cuenca, pero en otros casos no, como por ejemplo, recarga por canales o escorrentías provenientes de otras cuencas, pérdidas de los sistemas de distribución de agua potable o riego y descargas de aguas servidas, etc.

Respecto de la representación hidrogeológica, el método propone una secuencia que muestre antecedentes de información geológica que permitan ayudar a identificar diferentes formaciones con sus límites aproximados. Sin embargo, en términos prácticos la información que se presenta en los ejemplos de la metodología de sectorización es generalmente el límite relleno roca. En este caso, dependiendo de la escala de trabajo y las dimensiones de las unidades hidrogeológicas, esta información puede ser mejorada incorporando los criterios establecidos en la elaboración de mapas hidrogeológicos planteados por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Esto permite, para una zona determinada, zonificar las unidades hidrogeológicas, describir el tipo de flujo (intergranular v/s fisurado) y el potencial hidrogeológico del área. Adicionalmente, la metodología propone caracterizar las formaciones acuíferas usando como base los datos geofísicos disponibles para la zona, pero se le da un excesivo peso a la aplicación de las técnicas de TEM y gravimetría, siendo estas parte de numerosos otros métodos que permiten caracterizar la geometría acuífera. Métodos de prospección geofísica utilizados para estos estudios son por ejemplo los métodos geoeléctricos como los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs), tomografía geoeléctrica; o el método magnetotelúrico (MT), o métodos como la sísmica o radar de penetración terrestre, etc. La selección de cada método dependerá de los objetivos y nivel de detalle que se requiera alcanzar, como por ejemplo establecer la profundidad del basamento, zona saturada con agua subterránea v/s sectores sin agua subterránea o basamento impermeable, presencia de contaminación, propiedades y parámetros petrofísicos del subsuelo, estructuras geológicas, etc.

La metodología además propone incorporar información de los Parámetros Elásticos a partir de información de pruebas de bombeo realizadas en las captaciones que se ubican en el área de interés. Para este punto es recomendable tener en cuenta las profundidades acuíferas a que se refieren los valores individuales. Además, es relevante establecer con mayor detalle qué métodos de cálculo se consideran en la interpolación o definición de los parámetros elásticos. Como producto, se propone generar un ráster con los valores de transmisividades mediante ArcGIS (Toolboxes, My Toolboxes, 3D Analyst Tools, Raster Interpolation, Topo to raster). Sin embargo, al realizar esta interpolación muchas veces se pierde el foco de dónde y a qué sector en profundidad del acuífero corresponden estos valores. A pesar de esto, una subdivisión vertical del acuífero, aun cuando puede ser razonable, se debe analizar si es de relevancia considerarla para caracterizar el acuífero actualmente en explotación, considerando la necesidad que tiene la DGA para dar respuesta a las demandas del acuífero que realmente se utiliza.

La metodología señala que la incorporación de antecedentes de captaciones de Agua Subterránea a partir de catastros de captaciones, de la información de derechos solicitados, constituidos y denegados del área, debe considerarse en la sectorización con el fin de tener una idea del nivel de explotación del recurso hídrico en el área. En este punto se señala que también es relevante la incorporación de los niveles estáticos o las elevaciones del fondo del estrato seco superficial, medido por los TEMs disponibles, y que se pueden elaborar curvas isofreáticas representativas. En este caso se atribuye nuevamente una excesiva valoración al método TEM, existiendo otros métodos que dependiendo del caso pueden generar resultados similares o incluso mejores que este. La metodología, en este punto mezcla conceptos que debieran estar separados, uno es la ubicación de las captaciones y/o sus derechos de agua; y otra muy distinta es la geometría acuífera, la posición de su techo y fondo. Se propone separar estos conceptos y realzar la importancia de establecer un mapa de curvas isopiezométricas con la dirección de flujo de las aguas subterráneas, y de esta forma definir los límites de la cuenca de aguas subterráneas. Por otro lado para la DGA, puede ser un aspecto sumamente relevante, identificar las zonas que concentran trámites de derechos de agua pendientes por resolver (Derechos en Trámite).

Para la Sectorización Definitiva la metodología propone integrar toda la información de las etapas anteriores minimizando las mutuas dependencias. Se destaca como criterios hidrogeológicos relevantes y que determinarán una sectorización acuífera, al sentido del flujo subterráneo y la geometría que define este flujo, los espesores de relleno y sus parámetros elásticos (por ej., distribución de los valores de transmisibilidad), geometría del fondo impermeable del acuífero.

Adicionalmente, la metodología señala la posibilidad de incorporar Factores Complementarios siendo los principales, la calidad físico-química del agua y la presencia de Zonas sensibles o protegidas. Esto parece razonable y en este sentido, para aquellos casos en que sea relevante, se recomienda especificar o tener presente la geometría acuífera asociada a las variaciones de calidad del agua subterránea.

Por otro lado, la metodología señala la necesidad de identificar vínculos o conexiones entre los sectores definidos debido a posibles dependencias entre sectores vecinos. En sectores emplazados en paralelo, el vínculo puede ser un límite móvil asociado al nivel de extracción en cada sector. También es posible que este vínculo ocurra en el fondo del acuífero y entre sectores acuíferos, producto de las posibles conexiones acuíferas dada la geometría del basamento impermeable o permeabilidad de los límites entre sectores. La metodología propone como producto de esta etapa la generación de líneas o puntos con la ubicación geográfica de las áreas, secciones o ubicaciones vinculantes entre sectores acuíferos. Sin embargo, el formato y el tipo de antecedentes que se debieran incluir en este punto presentan una oportunidad de mejora en cuanto a los detalles de su definición.

Finalmente se destaca la elaboración de un Proyecto SIG y Respaldo Digital, que son fundamentales para documentar la sectorización realizada.

3. ESTUDIO GEOFÍSICO

Como se mencionó anteriormente, el levantamiento de 70 estaciones TEM y 70 estaciones de gravimetría fueron definidas por la DGA como parte de las actividades principales según la metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional. A continuación se describe el trabajo realizado.

La campaña geofísica se planificó con el fin de aprovechar los recursos disponibles al interior del área con mayor demanda administrativa para la DGA. Durante el transcurso del trabajo, y en acuerdo con la DGA se seleccionaron los sectores donde realizar este levantamiento geofísico. El área finalmente seleccionada se localiza al interior de un grupo de subcuencas hidrográficas que subterráneamente incluyen un área acuífera relativamente homogénea, definida esencialmente por la delimitación de los flujos de agua subterránea.

De esta forma, las estaciones y perfiles geofísicos fueron localizados con el objeto de generar información geofísica para la sectorización acuífera, y como input para futuras actualizaciones y/o mejoras en el conocimiento del balance hídrico y la disponibilidad de los recursos hídricos del área de estudio. Estos antecedentes definieron la orientación y localización de los perfiles geofísicos acordados con la DGA.

Para este estudio, y con el objeto de generar mayor información, Subterránea SpA ejecutó un total de 81 estaciones TEM y 141 estaciones gravimétricas, de las cuales 81 estaciones gravimétricas fueron localizando en una ubicación similar a la de las estaciones TEM. Las restantes estaciones gravimétricas se ubicaron en un perfil longitudinal atravesando la depresión central en sentido WE. Las estaciones TEM, en general, se ubicaron en perfiles de cuatro a seis y hasta ocho estaciones TEM contiguas, abarcando longitudes de aproximadamente 1 km con estaciones separadas cada ~200 m de cada punto central y loops individuales de 200x200 m.

La combinación del método TEM en conjunto con la gravimetría permitió generar un modelo de basamento hidrogeológico para el área de estudio. Para lo anterior, se utilizó como antecedente para la modelación gravimétrica la profundidad de basamento detectada por niveles de elevada resistividad en los sondeos de TEM. Con ello, el basamento hidrogeológico - geoeléctrico ha quedado bien resuelto en la parte occidental y central del área de estudio, mientras que en el flanco oriental entrega profundidades mínimas.

La Figura 3 presenta un resumen de los resultados del estudio geofísico realizado en este estudio, en donde se puede apreciar que el basamento alcanza predominantemente profundidades menores a 300 m, con extremos de hasta 500 m. Se incluyen dos perfiles gravimétricos localizados en la misma posición de dos perfiles utilizados en el estudio de Aquaterra (2011) en sectores aguas arriba y aguas abajo del acuífero denominado AC-02 (Río Ñuble) por el citado estudio.

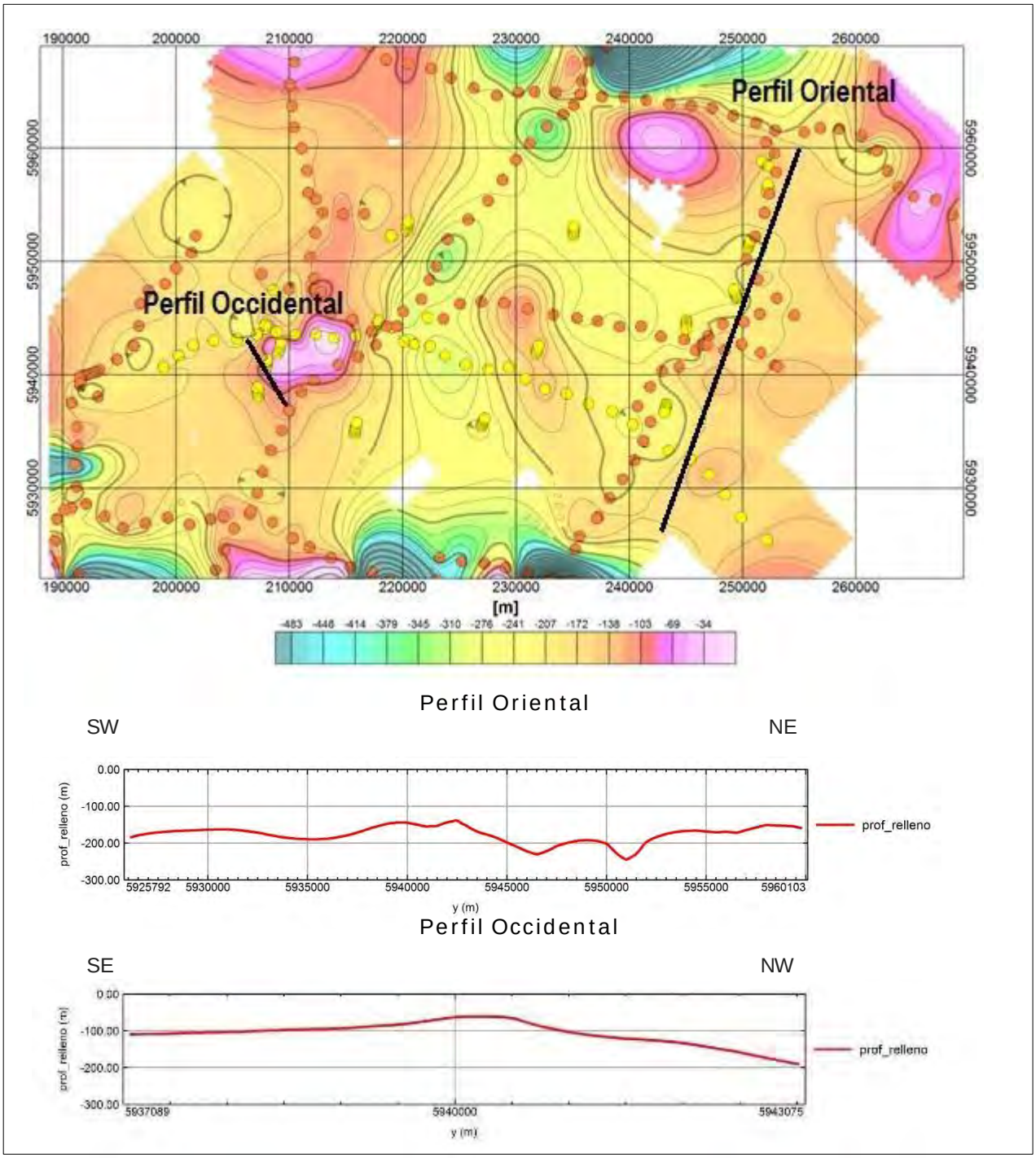


Figura 3. Resumen de la interpretación geofísica de la profundidad de Basamento a partir de una combinación de estudio TEM y de gravimetría (puntos en color amarillo, este estudio, y puntos en color naranja, gravimetría del estudio de Aquaterra (2011).

Profundidades mayores a 500 m se deben tomar con precaución ya que en este estudio no se levantaron estaciones gravimétricas o estaciones TEM directamente sobre estas áreas (puntos color amarillo, Figura 3), concentradas hacia el Norte y Sur del área estudiada.

En el Anexo N°1 se presenta el detalle del trabajo realizado, con los perfiles Geoeléctricos realizados y la interpretación gravimétrica efectuada. En este último caso, en el procesamiento de los datos se incluyó la información gravimétrica generada por el estudio de Aquaterra (2011).

En el Anexo N°2 se incluyen los respaldos digitales de la información geofísica generada durante el presente estudio, tanto respecto del TEM como de la gravimetría. Para los datos de TEM se incluyen las series de tiempo de las curvas de decaimiento en formato binario, las curvas de TEM procesadas, los modelos 1D y Perfiles 2D, y en el archivo Excel denominado NUBLE_TEM_Ubicacion-Modelo1D se incluye la localización de estos TEM, fecha del levantamiento y un resumen con los valores de resistividad aparente y espesores resultantes de los modelos de capa 1D. Respecto de la gravimetría, se incluyen los datos gravimétricos de adquisición y procesos, y también los datos del levantamiento de DGPS de terreno. Todas las localizaciones se presentan en el Datum WGS-84.

4. APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA SECTORIZACIÓN ACUÍFERA

Para la Sectorización Acuífera que se presenta se utilizó como guía las etapas o pasos sugeridos en el "*Manual de aplicación de la metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos"*, correspondiente al informe S.I.T. N° 341 realizado para la DGA por GCF INGENIEROS LTDA, (2014). Se utiliza la nueva información geofísica generada en este estudio, la que debido al nivel de detalle y en mérito del foco de este informe se presenta en forma anexa. En este caso, se tuvo por objetivo generar información relevante de forma de disponer de mejores argumentos técnicos que permitan justificar la toma de decisiones en el marco de la administración de los recursos hídricos de responsabilidad de la DGA.

4.1. IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

De acuerdo a las bases técnicas de la Licitación que dan origen a este estudio, y según las áreas de interés señaladas en estas bases, se tomó como área de estudio inicial una envolvente que se muestra en la Figura 4 y que incluyó todas estas áreas (Figura 1).

Con la información de derechos de agua con mayor demanda administrativa, localización y dirección de los flujos de agua subterránea, se acordó con la DGA un área más pequeña para desarrollar la sectorización definitiva y así también optimizar la obtención de una mejor caracterización geométrica del sistema acuífero mediante el levantamiento geofísico a desarrollar para este estudio (ver más adelante).

La metodología señala que la incorporación de antecedentes de captaciones de Agua Subterránea a partir de catastros de captaciones, de la información de derechos solicitados, constituidos y denegados del área, debe considerarse en la sectorización con el fin de tener una idea del nivel de explotación en el área. Sin embargo, para el caso del presente estudio, y en acuerdo con la DGA, se consideró relevante visualizar estos antecedentes para la definición del área a sectorizar.

La metodología propone identificar el área de estudio mediante un polígono que la contenga y sea definido por las coordenadas UTM de sus vértices (Datum SIRGAS o WGS84). La Tabla 1 muestra los vértices de la zona que contiene el área establecida en acuerdo con la DGA para la sectorización desarrollada en el presente estudio. Sin embargo, la geometría establecida no se corresponde con un polígono factible de identificar con cuatro vértices.

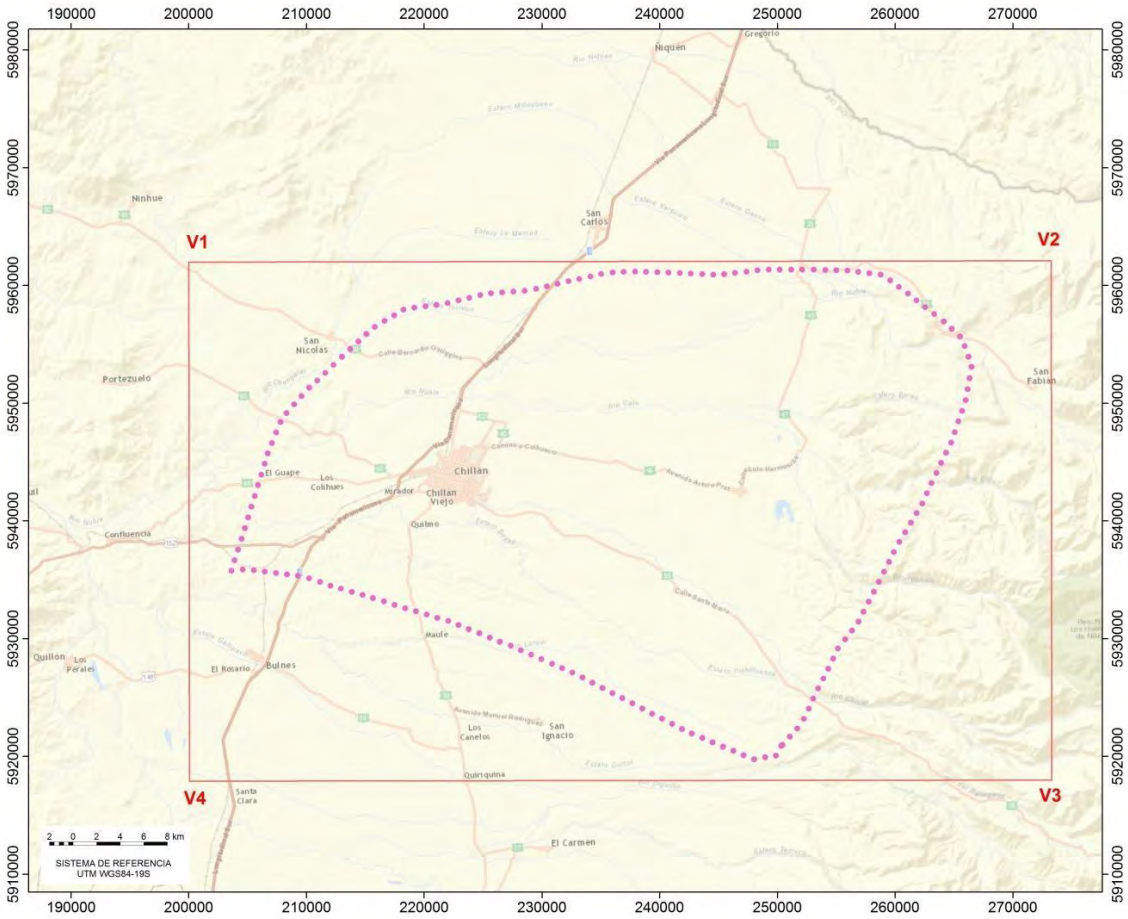


Figura 4. Zona de estudio (área con puntos color violeta) y polígono (área color rojo) con vértices de la zona que contiene.

Tabla 1. Vértices de la zona de estudio que contiene área acordada con DGA para la Sectorización (WGS-84, huso 19).

Vértice	UTM (E)	UTM (N)
V1	200000	5962000
V2	268000	5962000
V3	268000	5918000
V4	200000	5918000

4.2. BASE TOPOGRÁFICA

Si bien en el estudio de delimitación de acuíferos se propone obtener información altimétrica y de drenaje a partir de imágenes del sensor Aster, en el presente estudio toda la información altimétrica se generó a partir de las curvas de nivel de las hojas 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM), así como también el drenaje principal.

La base topográfica así elaborada y utilizada en el análisis de la sectorización se presenta en la Figura 5, la que muestra un plano de planta del área de estudio, que muestra las zonas planas, valles y rellenos contenidos en la cuenca o zona de estudio.

La extensión hacia los sectores con predominio de afloramientos de rocas consideró la presencia conocida de acuíferos relevantes.

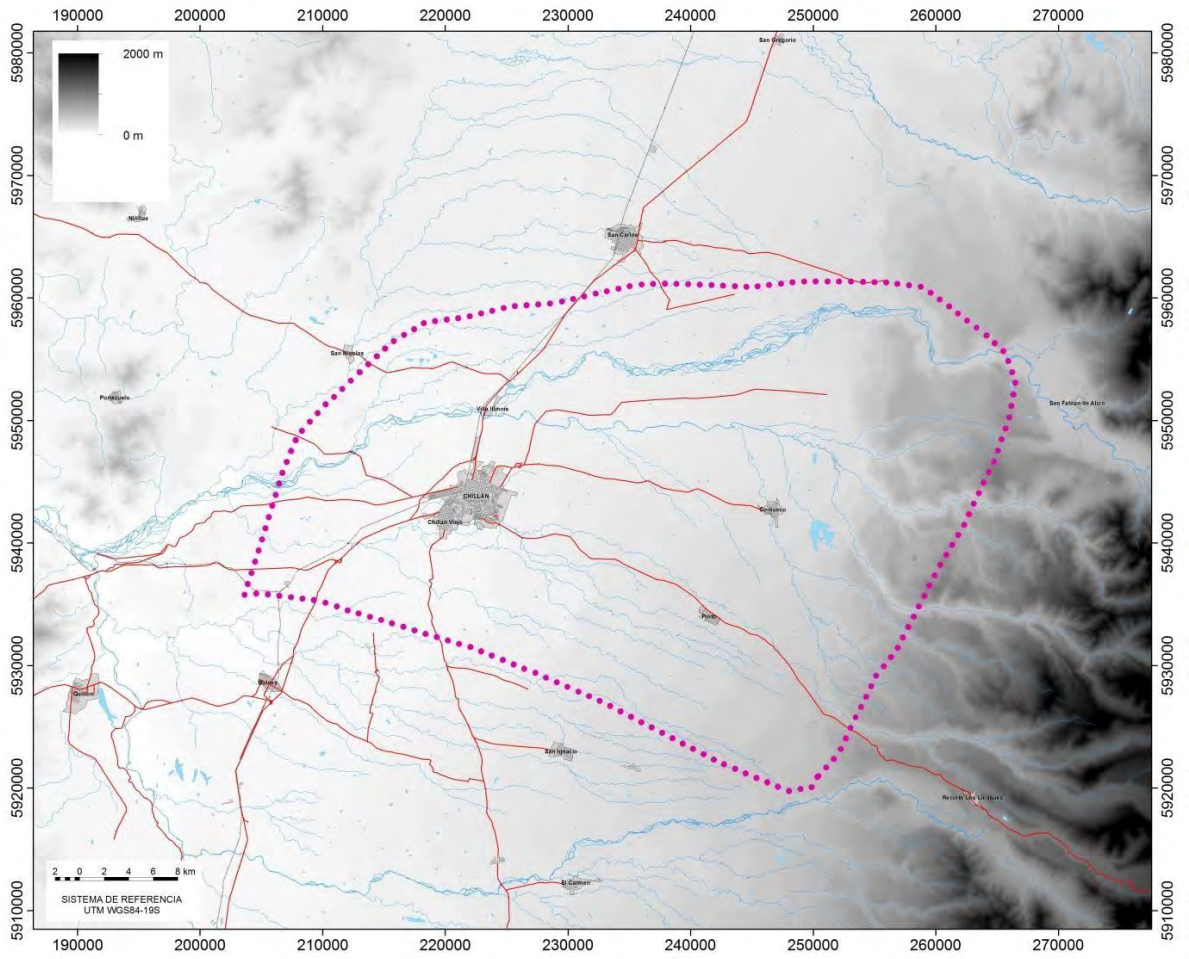


Figura 5. Base Topográfica con red de drenaje.

Adicionalmente, y para refinar los Modelos Digitales de Elevación (DEM), se utilizaron datos vectoriales contenidos en el estudio de Aquaterra "Estudio hidrogeológico cuencas Biobío e Itata, 2011". El modelo utilizado en este proyecto para confeccionar el DEM, fue realizado a partir de curvas de nivel con equidistancia de 20 m, sobre una red de triángulos (TIN, con interpolación lineal). Una vez interpolado, se transformó dicho TIN a

un archivo raster Grid, que no es más que un DEM con una resolución de 1 m (versus Aster que su resolución espacial es de 15 m), llegando a obtener de esta forma un archivo GEO TIFF de 29335x18837 pixeles, de 2,06 Gb y 50 m como altitud mínima y 3.200 m como altitud máxima.

4.3. RED DE DRENAJE

La metodología propone definir el trazado de la red de drenaje mediante el uso de herramientas automáticas como el software ArcGIS (Spatial Analyst Tools, Hydrology, Flow direction y Flow accumulation) o un programa específico para ese proceso como WMS, por ejemplo. Para el presente estudio se utilizaron los softwares WMS y ArcHydro sobre la base de la información topográfica. Sin embargo, debido al escaso contraste topográfico existente en la depresión central, donde los gradientes son del orden de 0,8%, ambos softwares arrojaron errores y vacíos de información, con lo cual el método automático no dio buenos resultados en el área de mayor interés para este estudio.

Finalmente, considerando el nivel de detalle de la información existente, la red de drenaje fue construida utilizando información existente de ríos, quebradas permanentes e intermitentes a partir de la información vectorial de la Mapoteca de la DGA, Cartas IGM Sección F.

La Figura 6 muestra la red de drenaje principal con cursos de agua principal, la red de drenaje secundaria, la cual fue procesada para eliminar cursos no relevantes y/o confusos como los canales. Tampoco se consideraron los cuerpos de agua, como lagos, lagunas, embalses, etc., que pueden ser considerados para estimaciones de balances hídricos y/o recargas. Sobre esta figura se incluye la delimitación de subcuencas de la Mapoteca de la DGA.

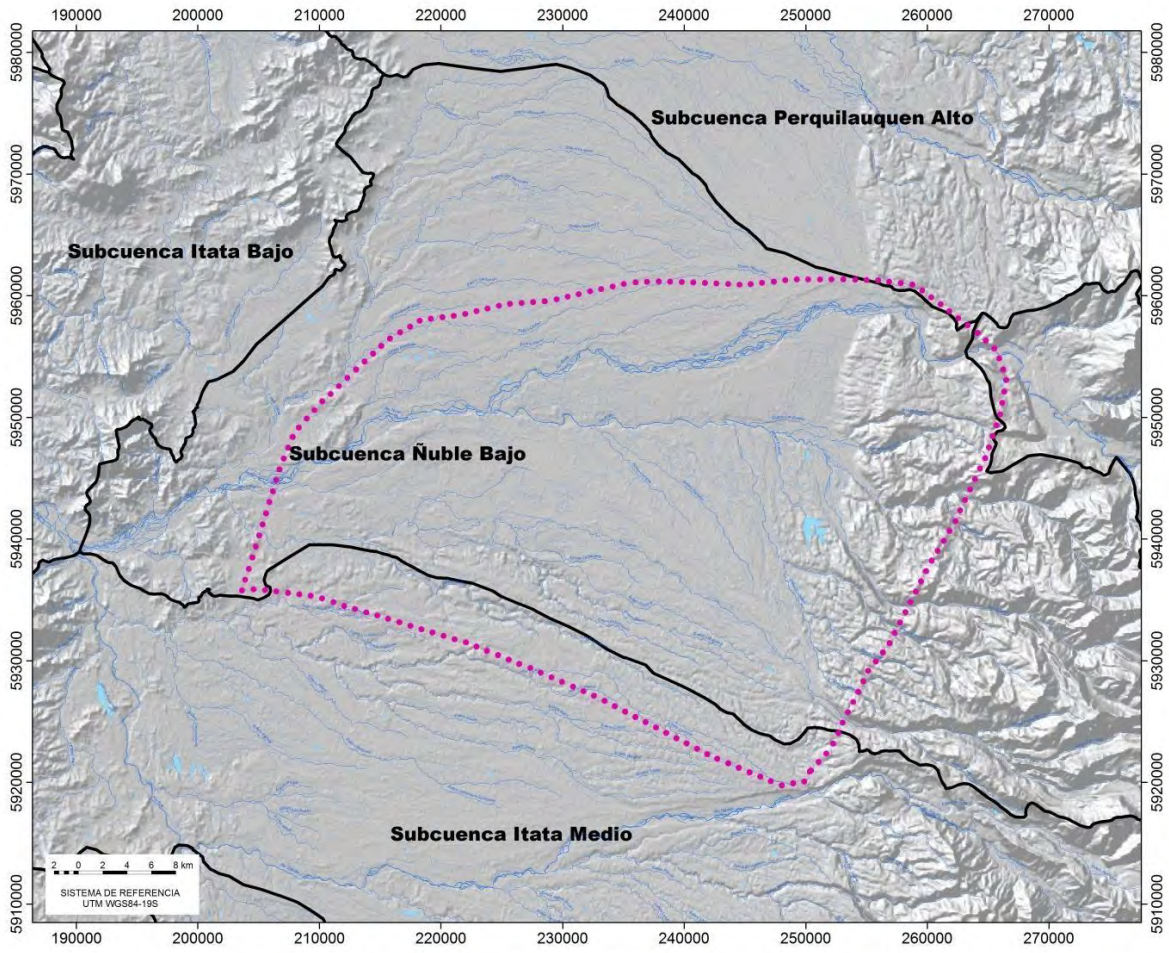


Figura 6. Red de drenaje y subcuencas principales según Mapoteca DGA.

4.4. SUBCUENCAS (SECTORIZACIÓN PRELIMINAR)

Como paso inicial para definir las subcuencas hidrográficas al interior del área a sectorizar, se procesó la información topográfica y el drenaje mediante los softwares WMS y ArcHydro, considerando un área mucho mayor al área a sectorizar, cubriendo hasta el límite con Argentina por el oriente, y hasta la costa por el poniente. Sin embargo, debido al escaso contraste topográfico existente en la depresión central, donde los gradientes son del orden de 0,8 %, ambos softwares arrojaron errores y vacíos de información, con lo cual el método automático no dio buenos resultados en el área de mayor interés para este estudio. Sin embargo, a escala regional la delimitación automática de las cuencas sí se utilizó como base para la delimitación de subcuencas.

Finalmente, las subcuencas de drenaje superficial se construyeron a partir de la base topográfica de las curvas de nivel, de la red de drenaje de primer y segundo orden, de un modelo de elevación digital (DEM) con resolución cada 5 m, de un mapa de pendientes y con apoyo, en parte, de aplicación de los softwares WMS y ArcHydro (Figura 7).

Se destaca que, la sectorización pretende contribuir a la definición de sectores acuíferos, por tanto el foco debiera establecerse en definir áreas de recarga para estos acuíferos, que en general coinciden con los límites de cuenca, pero en otros casos no, como por ejemplo, recarga por canales o escorrentías provenientes de otras cuencas, pérdidas de los sistemas de distribución de agua potable y riego o de las descargas de aguas servidas, etc.

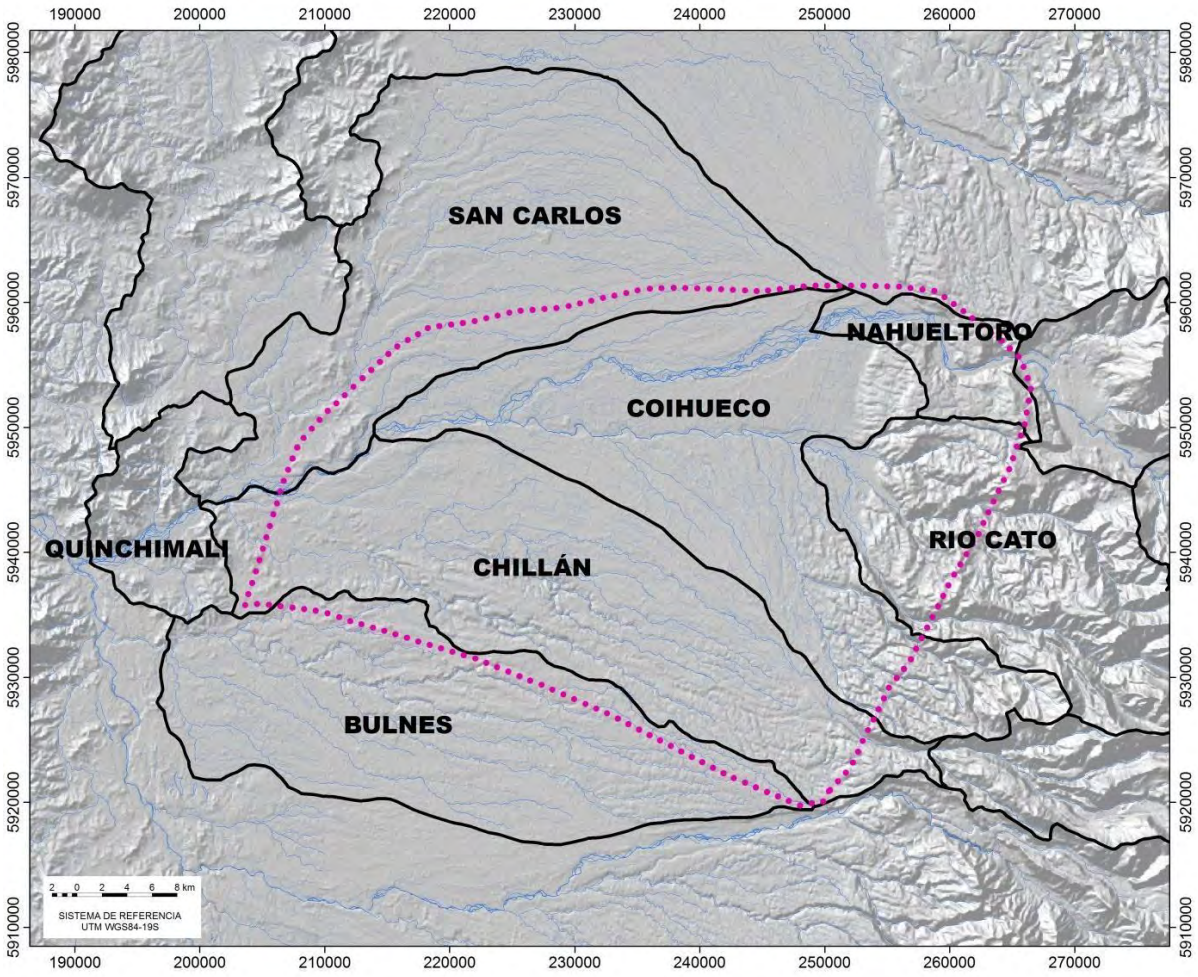


Figura 7. Subcuencas de drenaje e hidrografía con denominación sobre el DEM.

4.5. HIDROGEOLOGÍA

Si bien el foco de este estudio es la sectorización acuífera, se debe destacar que la generación de nueva información geofísica establecida en las bases de la licitación para este estudio, corresponde a la mayor parte de los recursos destinados a esta sectorización. Es por ello, y en atención a la relevancia de estos antecedentes, que se incluyen de manera Anexa los resultados de los levantamientos geofísicos realizados. A continuación, se presenta la información hidrogeológica, de acuerdo al siguiente orden: geología, captaciones de aguas subterráneas y profundidad del agua subterránea, dirección del flujo subterráneo, parámetros elásticos, geometría y formaciones acuíferas.

4.5.1. Geología

La geología del área estudiada fue compilada a partir de diversos estudios realizados en el área los cuales cartográficamente se sintetizan en la referencia utilizada en el mapa de la Figura 8, elaborado con los antecedentes de SERNAGEOMIN (2012). Hacia el oriente, fuera del área de estudio, se destaca la presencia cercana de los sistemas volcánicos Chillán, un estrato volcán histórico, y del volcán Nevados de Chillán, los cuales tienen una marcada influencia en las génesis de las rocas alojadas en la cuenca del río Itata.

Sector oriental:
Rocas intrusivas del Carbonífero-Pérmico (CPg). Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas de hornblenda y biotita, localmente de muscovita. Afloran próximos al área de estudio.

Rocas del tipo intrusivas del Cretácico inferior alto-cretácico superior bajo (Kiag). Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas monzodioritas de hornblenda y biotita. Asociados a mineralización de Fe, Cu, Au. Afloran próximos al área de estudio.

Rocas sedimentarias del Triásico Superior (Tr1m). Secuencias sedimentarias marinas y transicionales; areniscas conglomerados, limonitas y calizas. Afloran fuera del área de estudio.

Sector central:
Rocas sedimentarias del Pleistoceno-Holoceno (Q1). Depósitos aluviales coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados.

Sector poniente:
Rocas del tipo volcanosedimentario del Oligoceno-Mioceno (OM2c). Secuencia volcanosedimentaria; lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas.

Rocas del tipo intrusiva del Mioceno (Mg). Granodioritas, dioritas, tonalitas.

Rocas del tipo volcánicas del Plioceno-Pleistoceno (PPl3). Secuencias y centros volcánicas parcialmente erodados, lavas basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados.

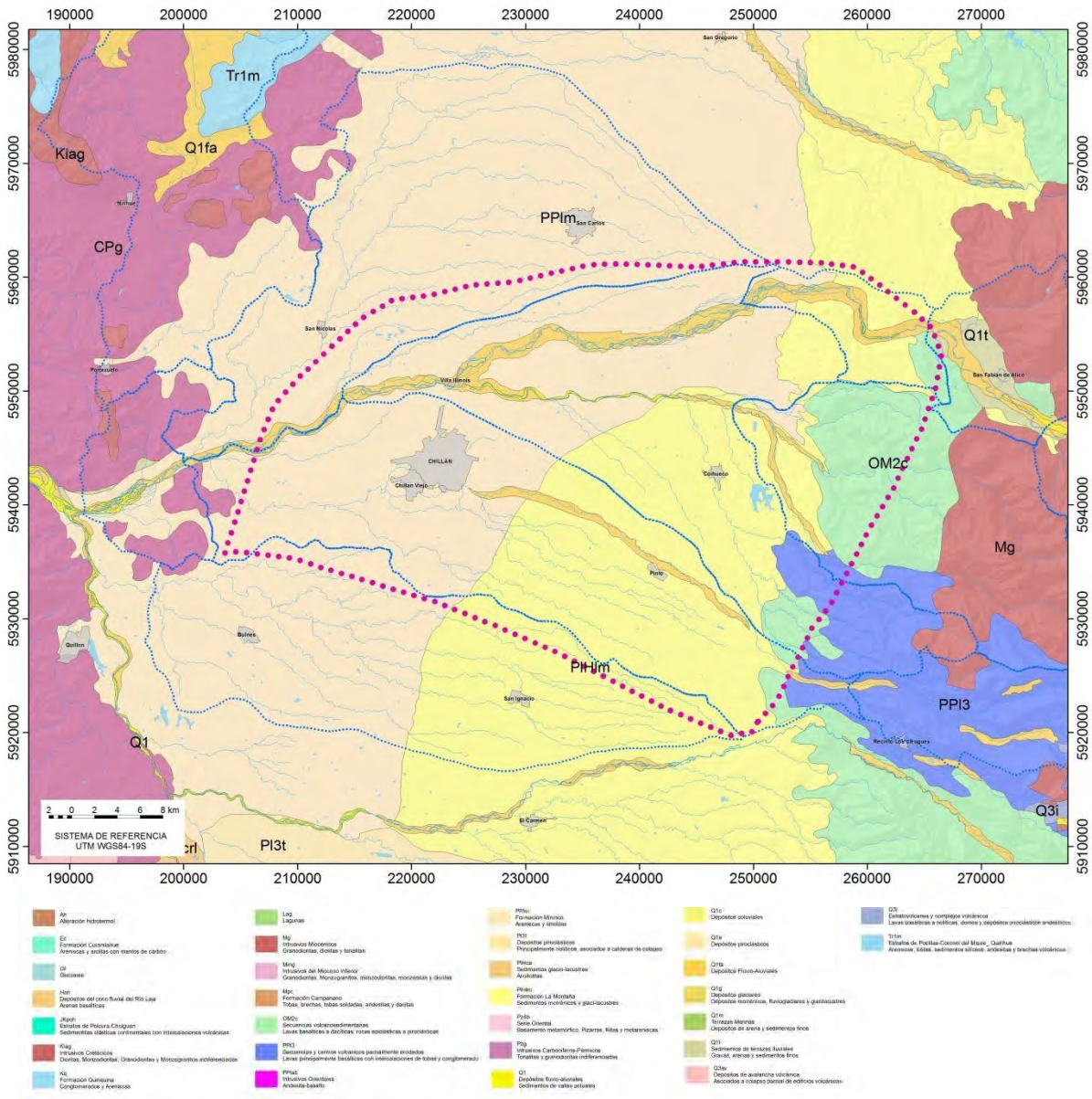


Figura 8. Mapa Geológico del área de estudio.

4.5.2. Captaciones de agua subterránea y profundidad del agua subterránea

El análisis de los derechos de agua, incluyendo los derechos en trámite, derechos solicitados, constituidos y denegados del área, fue realizado con antecedentes de los catastros de captaciones proporcionados por la DGA. Como se puede apreciar, de la

Figura 9, los derechos de agua y las solicitudes pendientes se concentran en torno a Chillán, al sur del estero Changaral, en el área a sectorizar.

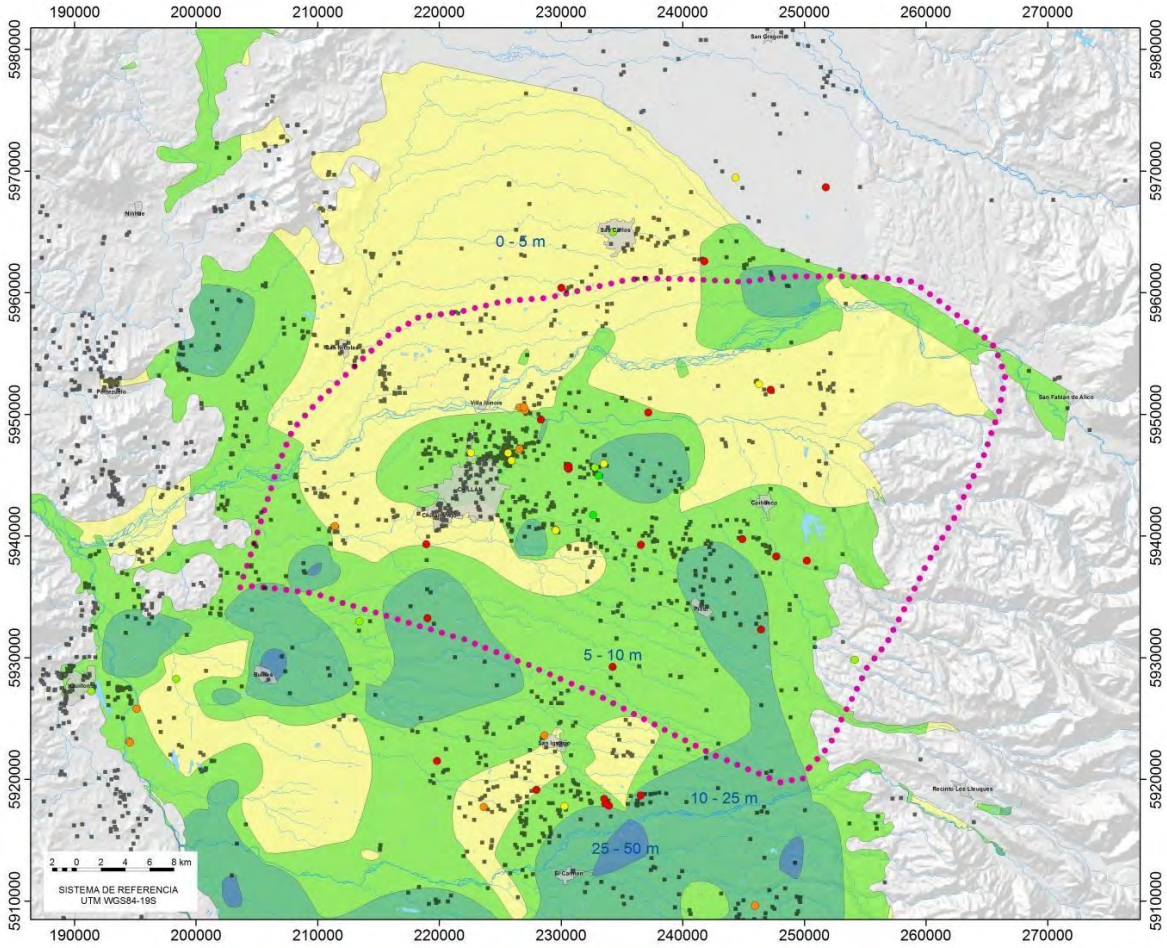


Figura 9. Localización de captaciones subterráneas (puntos color negro), solicitudes de derecho en trámite (puntos de colores) y profundidad del agua subterránea.

El área propuesta para la sectorización y aplicación del levantamiento geofísico desarrollado en este estudio se focalizó en el sistema acuífero que, a la fecha, concentra la mayor demanda por cuanto presenta la mayor cantidad de captaciones y solicitudes de derecho por resolver o sin asignación de derechos. Esto permitirá aprovechar de mejor forma la información geofísica a levantar en este estudio, y así mejorar de manera integral el conocimiento hidrogeológico para una mejor gestión de los recursos hídricos del área de sectorización definitiva.

4.5.3. Unidades Hidrogeológicas y dirección de flujo del agua subterránea

La metodología de sectorización de acuíferos propone una secuencia que muestre antecedentes de información geológica que permitan ayudar a identificar diferentes formaciones con sus límites aproximados. La información disponible se puede simplificar al límite relleno - roca. Sin embargo, para este trabajo se presenta una representación hidrogeológica (Figura 10) que incorpora los criterios establecidos en la elaboración de mapas hidrogeológicos planteados por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (Struckmeier, et. al., 1995).

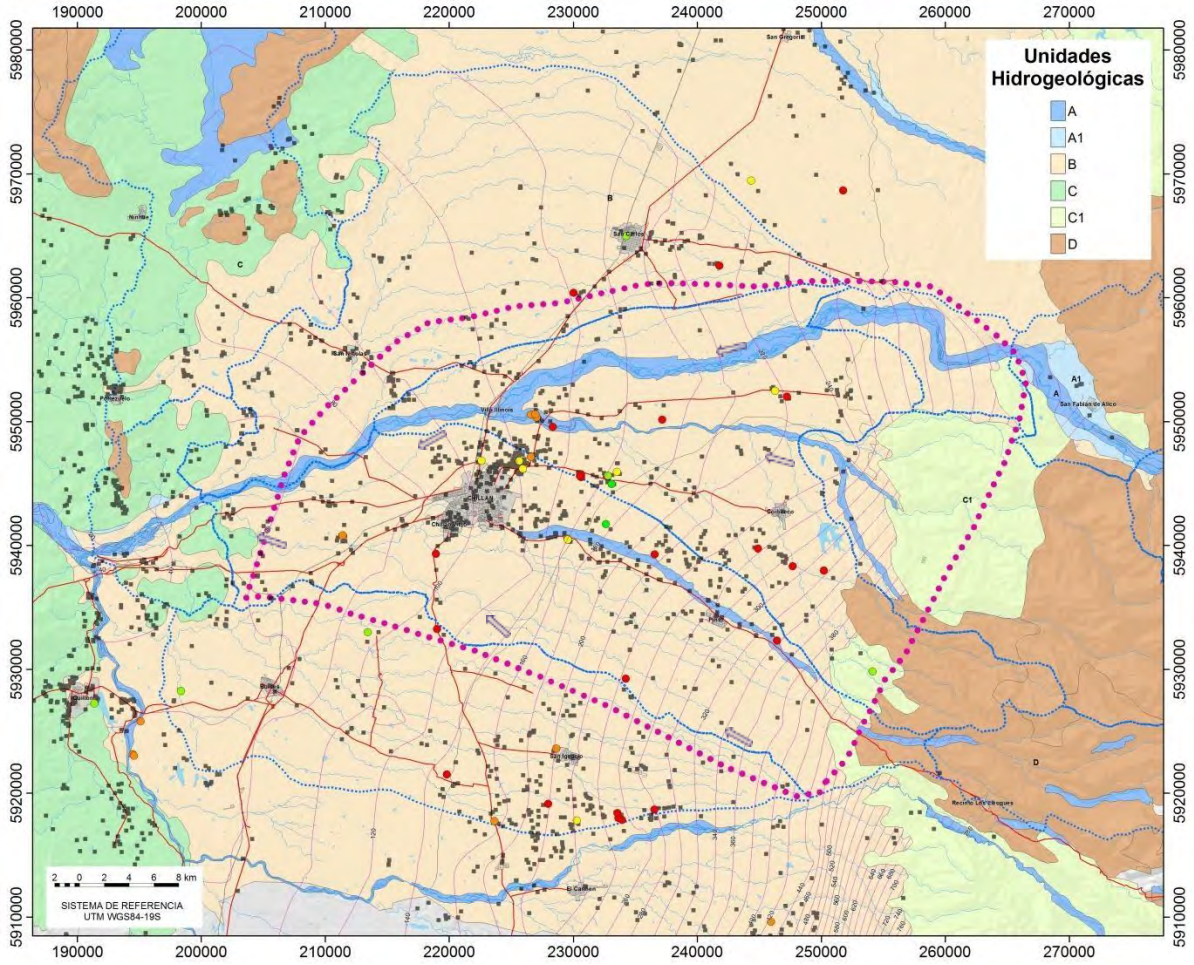


Figura 10. Mapa hidrogeológico y en color violeta isopiezas (msnm) y direcciones del flujo subterráneo.

De esta forma, para comprender la distribución espacial de la ocurrencia del agua subterránea, se presenta un mapa hidrogeológico que incluye las curvas isopiezométricas con la dirección de flujo de las aguas subterráneas junto a la información de derechos de

agua mostrados en el mapa de la Figura 10. Cabe destacar que el área a sectorizar representa una divisoria de aguas subterráneas.

Cabe señalar, que este mapa representa una síntesis regional de la información disponible a la fecha, y puede ser actualizado y/o mejorado en la medida que se incluyan nuevos antecedentes.

A continuación se describen las unidades hidrogeológicas presentadas en el Mapa hidrogeológico.

- Unidad A. Acuíferos de alta a mediana importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados. Acuíferos intergranulares, productivos, amplia a medianamente extendidos en forma longitudinal en los depósitos fluviales y fluvioaluviales (Unidades geológicas: Q1, Q1fa).

- Unidad A1. Acuíferos de mediana a baja importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados. Acuíferos intergranulares, locales y con productividad irregular, restringidos a los depósitos fluviales aterrazados de la parte alta de la cuenca (Unidad geológica: Q1t).

- Unidad B. Acuíferos de mediana importancia hidrogeológica en rocas o depósitos no consolidados que forman acuíferos de amplia distribución pero restringidos a niveles permeables multiacuíferos con intercalaciones de litologías de menor permeabilidad (Unidades geológicas: PPlm y PlHlm).

- Unidad C. Acuíferos de mediana a baja importancia hidrogeológica en rocas fisuradas o meteorizadas Acuíferos locales y con productividad irregular (Unidades geológica: Cpg).

- Unidad C1. Acuíferos de baja importancia hidrogeológica en rocas fisuradas. A pesar que no se conocen muchos antecedentes, se deduce de las características geológicas de esta unidad podría conformar acuíferos locales y con productividad irregular (Unidas geológica: OM2c).

- Unidad D. Acuícludos o acuífugos de nula a muy baja importancia hidrogeológica con rocas esencialmente sin recursos de agua subterránea (Unidades geológicas: Kiag, Tr1m, Mg, PPl3).

Las unidades hidrogeológicas que predominan al interior del área a sectorizar corresponden a las Unidades A, B, C1 y D. Respecto de estas dos últimas, no se conocen antecedentes hidrogeológicos que den cuenta de la presencia de acuíferos relevantes. En esta área, las Unidades C1 y D, se localizan en zonas elevadas o de mayor cota respecto de las Unidades A y B, por tanto dado lo antes señalado y debido a sus características litológicas se asume corresponden a áreas de baja relevancia para la sectorización acuífera.

Nuevos antecedentes de exploraciones y explotaciones de agua subterránea, podrían cambiar esta premisa, por cuanto en el futuro, y de confirmarse la presencia de acuíferos

de interés en estas unidades, podría aumentar la demanda por derechos de agua en estos sectores, los cuales pueden localmente conformar en mayor o menor medida áreas de almacenamiento y recarga para los acuíferos localizados aguas abajo asociados a las Unidades A y B. Es factible que al interior de estas unidades, se presenten depósitos similares a los conformados por la Unidad A1, especialmente hacia el sector oriental del área estudiada.

El basamento de la cuenca está conformado por las Unidades C, C1 y D, los cuales, salvo sectores puntuales o restringidos arealmente a zonas de mayor permeabilidad primaria o secundaria, con los antecedentes que se tienen a la fecha, se consideran impermeables.

4.5.4. Unidades acuíferas y su distribución espacial

La metodología propone caracterizar las formaciones acuíferas del área de estudio usando como base la información geológica y los datos geofísicos disponibles para la zona. La Figura 11 sintetiza la información elaborada por el estudio geofísico realizado en este trabajo, al interior del sistema acuífero definido por las unidades hidrogeológicas de mayor potencial (Unidades A y B). En esta figura se muestra el relieve o morfología del basamento, las profundidades de basamento, y los límites entre cuencas de basamento.

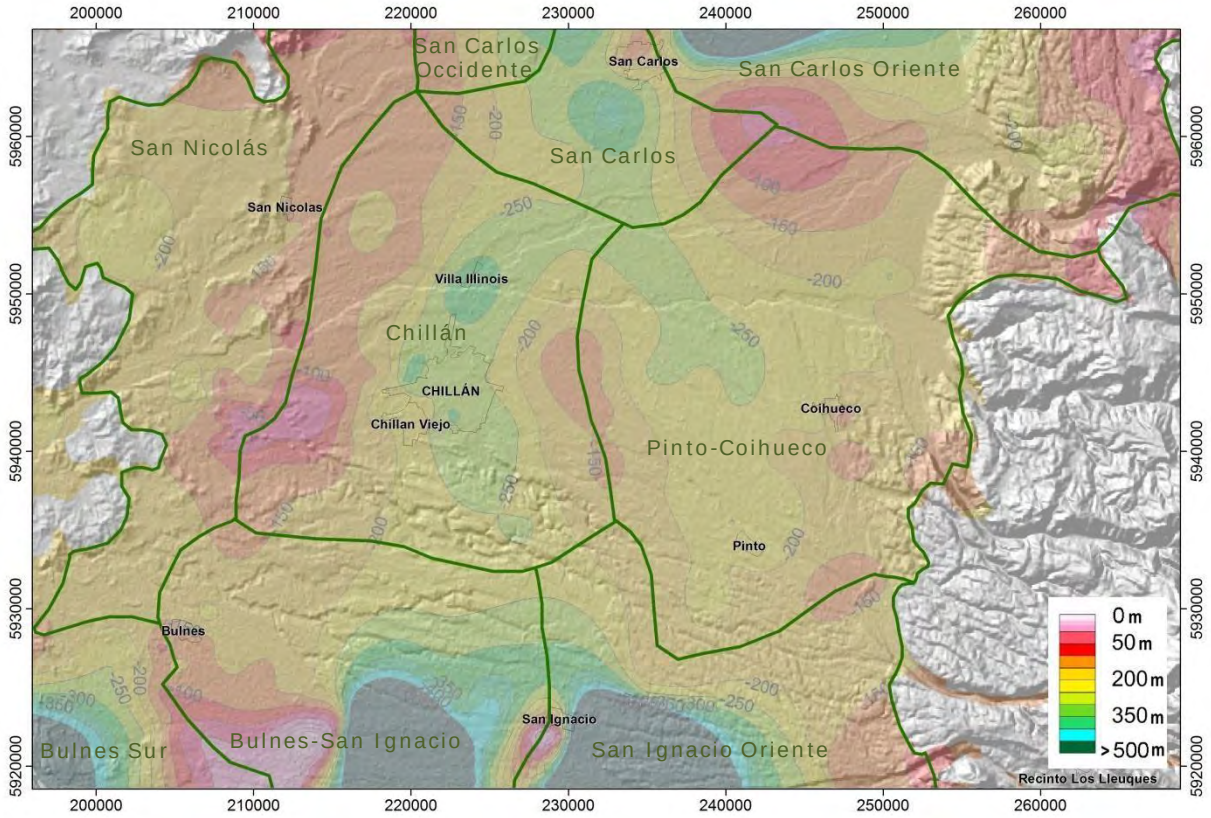


Figura 11. Mapa de profundidad del basamento y relieve o cuencas de basamento representadas como polígonos color verde.

Con el objeto de identificar las cuencas de basamento para la sectorización acuífera, estas se han denominado de acuerdo a los siguientes nombres según la toponimia de las localidades respectivas: San Nicolás, San Carlos Occidente, San Carlos, San Carlos Oriente, Chillán, Pinto-Coihueco, Bulnes Sur, Bulnes-San Ignacio y San Ignacio Oriente.

4.5.5. Parámetros elásticos

De acuerdo a la metodología de sectorización se debe incorporar información de los parámetros elásticos a partir de información de pruebas de bombeo realizadas en las captaciones localizadas en el área de interés. En el área de estudio existe una gran cantidad de captaciones con diferentes grados de información y con niveles acuíferos a diferentes profundidades y con distintos grados de confinamiento. Los valores de transmisividad y coeficientes de almacenamiento se deben analizar con bastante detalle de tal forma de utilizarlos para la sectorización.

La Figura 12 muestra una integración areal de valores de transmisividad tomados del estudio de Aquaterra (2011). Para el área de estudio se destacan tres grandes polígonos con valores diferentes respecto de su entorno. Estas son dos zonas con valores mayores a 150 m^2/día, una localizada en el extremo oriente y otra al sur del área de estudio y una zona central, con valores menores a 150 m^2/día.

Para este punto, es recomendable tener presente las profundidades acuíferas que se consideran en la interpolación de valores individuales de transmisividad. Sin embargo, a pesar de que al realizar una generalización o interpolación como la mostrada en la Figura 11, no se reconoce la profundidad del o de los niveles acuíferos a los cuales se hace referencia, para los objetivos del presente estudio se considera razonable realizar esta simplificación.

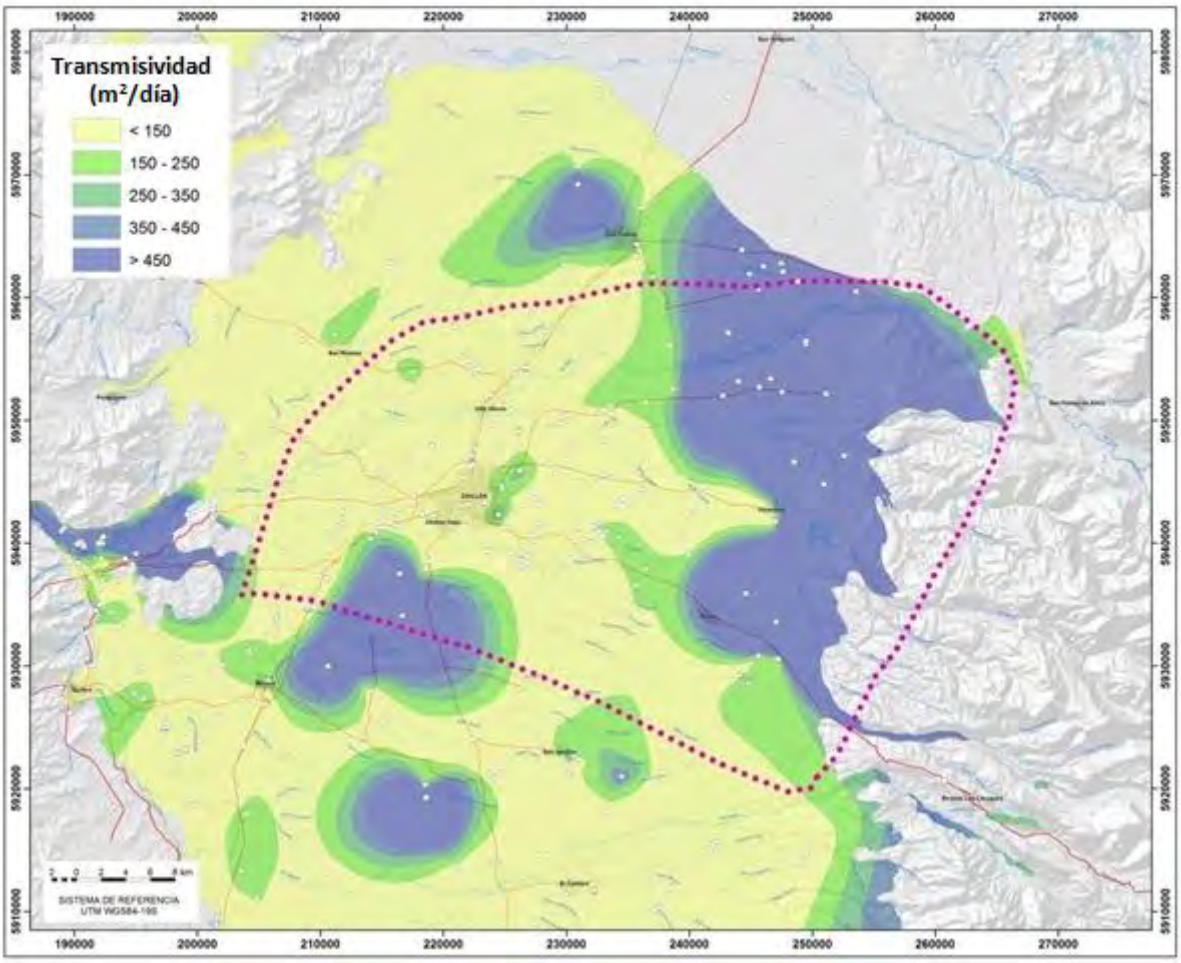


Figura 12. Mapa de isovalores de transmisividad (m^2/día) y localización de pozos (puntos color blanco) considerados.

4.6. FACTORES COMPLEMENTARIOS

La metodología señala la factibilidad de incorporar Factores Complementarios siendo los principales, la calidad físico-química del agua y la presencia de Zonas Sensibles o Protegidas. Esto parece razonable y pudiera especificarse la geometría acuífera asociada a las variaciones de calidad del agua subterránea. Durante el transcurso del trabajo no se detectó información relevante desde el punto de vista de la calidad de las aguas. Adicionalmente durante una presentación del proyecto a personal de la DGA tanto central como de la VIII Región, se consultó a este respecto y tampoco se informó de antecedentes relevantes.

Una subdivisión complementaria se puede realizar considerando las área de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos establecidas en el estudio de Aguirre et. al., (2004). Sin embargo, no se consideró relevante para los fines de este estudio, por cuanto ésta corresponde a un instrumento de planificación de uso del suelo y complejizaría demasiado la sectorización con un número mayor de sectores.

4.7. SECTORIZACIÓN DEFINITIVA

Continuando con la secuencia indicada en la metodología y utilizando antecedentes de geología, geofísica, información estratigráfica, formaciones acuíferas, parámetros elásticos y captaciones de aguas subterráneas, se generó la sectorización acuífera definitiva.

Las unidades hidrogeológicas de la depresión central con mayor potencial hidrogeológico corresponden a una serie de polígonos de diversos tamaños los cuales están conectados hidrogeológicamente de acuerdo a las direcciones del flujo subterráneo. Estas unidades son las denominadas Unidad A y Unidad B, y en conjunto conforman el sistema acuífero y alojan la mayor cantidad de pozos del área de estudio. De esta forma, y con el objeto de generar una sectorización acuífera con una cantidad limitada de sectores acuíferos, se considera para la presente sectorización la totalidad de estas unidades como representativa del sistema acuífero.

De esta forma, se procedió a generar los sectores acuíferos definitivos, los que finalmente se definieron al intersectar los polígonos correspondientes a las cuencas de basamento (Figura 11) y los valores de transmisividad agrupados en polígonos con valores mayores y menores que 150 m^2/día (Figura 12). En la Figura 13 se presenta la sectorización señalada y se incluyen los vínculos asociados y descritos más adelante. Los vínculos entre los sectores acuíferos se representan mediante flechas color violeta y blanco para la parte superior e inferior del acuífero respectivamente

Para la presente sectorización, dependiendo de la profundidad se reconocieron dos tipos de vínculos, uno somero y otro profundo. El vínculo somero corresponde a las posibles interacciones del acuífero producto de las direcciones del flujo del agua subterránea (Figura 10). El vínculo profundo se deduce de las direcciones preferenciales de las resultantes de la morfología de basamento, similar al caso de escorrentías superficiales (Figura 11).

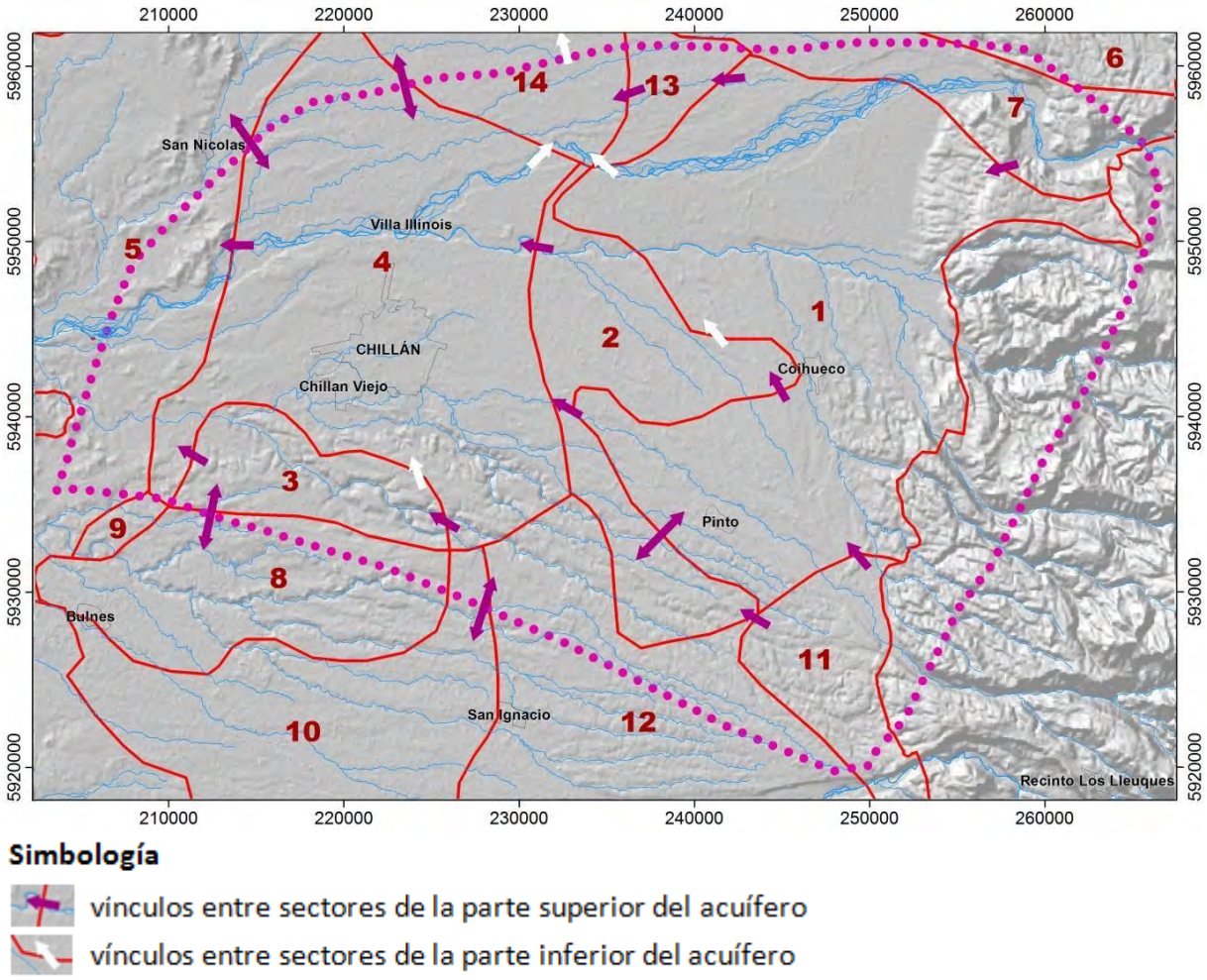


Figura 13. Sectorización definitiva de acuíferos con polígonos y números en color rojo.

En la Tabla 2 se presenta la sectorización definitiva, en donde se caracterizan 14 sectores acuíferos descritos de acuerdo a las unidades hidrogeológicas contenidas en cada sector, valores de transmisividad predominantes y las cuencas hidrográficas y de basamento que les corresponden.

Tabla 2. Sectores acuíferos y sus características más relevantes.

Sector Acuífero	Unidad Hidrogeológica	T (m^2/día)	Cuenca de basamento	Cuenca hidrográfica
1	B y A	> 150	Pinto-Coihueco	Coihueco, río Cato, Chillán
2	B y A	< 150	Pinto-Coihueco	Coihueco, Chillán
3	B	> 150	Chillán	Chillán, Bulnes
4	B y A	< 150	Chillán	Chillán, Coihueco, San Carlos
5	B y A	< 150 (1)	San Nicolás	San Carlos, Chillán y Bulnes
6	B	> 150 (2)	San Carlos Oriente	Cuenca al Norte de cuenca Nahueltoro
7	A y B	> 150	San Carlos Oriente	Nahueltoro, Coihueco, San Carlos
8	B	< 150	Chillán	Bulnes, Chillán
9	B	< 150	Bulnes-San Ignacio	Bulnes
10	B	< 150	Bulnes-San Ignacio	Bulnes
11	B y A	> 150	San Ignacio Oriente	Chillán, Coihueco, y cuenca al sur este de cuenca Chillán
12	B	< 150	San Ignacio Oriente	Bulnes, Chillán
13	B y A	> 150	San Carlos	Coihueco, San Carlos
14	B y A	< 150	San Carlos	Coihueco, San Carlos

Notas. (1) Valores al interior del área a sectorizar, (2) valor estimado, pero a partir de escasos datos.

4.8. VÍNCULOS O CONEXIONES

La independencia hidrogeológica entre sectores acuíferos contiguos pocas veces se encuentra en sistemas reales, por ello, tras definir la sectorización acuífera es necesario establecer los vínculos o conexiones entre los sectores definidos.

La metodología propone como producto de esta etapa la generación de líneas o puntos con la ubicación geográfica de las áreas, secciones o ubicaciones vinculantes entre sectores acuíferos. De esta forma se deben identificar vínculos o conexiones entre los sectores definidos debido a posibles dependencias entre sectores vecinos.

El vínculo puede tratarse de un caudal pasante, en sectores ubicados en serie. Para estos sectores la recarga y la extracción aguas arriba afecta el flujo de entrada en sectores ubicados aguas abajo. En sectores emplazados en paralelo, el vínculo puede ser un límite móvil asociado al nivel de extracción en cada sector.

Para la zona de estudio, en la Figura 13, se incluyen vínculos asociados a flujos subterráneos pasantes, los cuales dependiendo del nivel de explotación del acuífero podrían variar sus límites ya que están conectados hidrogeológicamente. En la misma figura es posible apreciar que la divisoria correspondiente al flujo de aguas subterráneas, la que coincide con el área a sectorizar.

Los sub-sectores definitivos, estarán relacionados por flujos de entrada y salida, superficiales y subterráneos. Asimismo, en algunos casos podrán estar vinculados por los niveles de extracción en cada sector, cuando el bombeo muy intenso pueda modificar la divisoria de un cierto sector hidrogeológico, e incluso llevarla más allá de la divisoria del flujo superficial.

Como se mencionó, otros vínculos posibles de establecer se refieren a calidad fisicoquímica del acuífero o zonas sensibles o protegidas. Sin embargo, a la fecha y respecto de estos aspectos no se han detectado factores relevantes.

4.9. PROYECTO SIG

Para este informe se entrega un avance del proyecto SIG y un respaldo digital con los antecedentes utilizados para esta Etapa. Proyecto SIG, los que son fundamentales para documentar la sectorización realizada y facilitar futuras actualizaciones del mismo.

El proyecto SIG se desarrolló íntegramente en ArcGIS 10, apoyado con el software Arc HydroTools, para los procesos de análisis espacial de imágenes raster. El proyecto está almacenado bajo una sola Personal Geodatabase (GDB) bajo el sistema de referencia UTM WGS84-19S, con los datos raster separados de la GDB, pero almacenados bajo las mismas carpetas del proyecto.

Como base del presente estudio se tomaron datos obtenidos de diferentes fuentes de información como la Mapoteca de la DGA, antecedentes SIG del estudio Aquaterra (2011), antecedentes digitales asociados a la licitación que dio origen al presente estudio, entre otros.

En el Anexo N°2 se incluye el archivo de proyecto llamado "SIG Ñuble.mxd" y los datos y la topología contenida en el presente SIG, la que contiene puntos, polígonos, líneas, raster (GEO TIFF), tin. Contiene información respecto de las áreas consideradas, topografía, toponimia, redes de drenaje, subcuencas, derechos de agua, unidades geológicas e hidrogeológicas, antecedentes geofísicos existentes y generados en el presente estudio, geometría acuífera, valores de transmisividad, vínculos y los sectores acuíferos definidos en este estudio. El Anexo N°2 también contiene los antecedentes en formato adobe (.pdf) del presente informe.

La Tabla 3, presenta de manera secuencial los pasos realizados y los productos digitales asociados a cada paso para el análisis y elaboración del presente informe. Se incluye a modo de referencia el nombre de la figura referida a estos pasos y mostrada en el presente informe.

Tabla 3. Resumen de los pasos realizados para sectorización con indicación de las coberturas feature class de ArcGIS que respaldan el estudio.

Paso		Productos digitales
1	Identificación de la zona de estudio (Figura 4)	Área que define el sector de estudio (feature class Área_a_Sectorizar), los vértices del rectángulo que la incluye (feature class Límite-Estudio-Detalle), y una base topográfica y de fondo con feature class complementarios.
2	Base topográfica (Figura 5)	Raster con modelo de elevación digital DEM (feature class Dem-5m.tiff) y cobertura de polilíneas de curvas de nivel (feature class Hidrografía) y feature class complementarios. Se incluye un grupo de capas adicionales con una imagen Lansat 321 y feature class complementarios.
3	Red de drenaje (Figura 6)	Cobertura de polilíneas y polígonos referidas a la red de drenaje (feature class Drenaje principal, Drenaje Secundario, Cuerpos de Agua) y feature class complementarios.
4	Subcuencas (Figura 7)	Cobertura de polígonos referidos a las Subcuencas generadas (feature class Subcuencas_Generadas) y feature class complementarios.
5	Geología (Figura 8)	Cobertura de polígonos referidos las unidades geológicas (feature class Geología) y feature class complementarios.
6	Captaciones de agua subterránea (Figura 9)	Cobertura de puntos con el listado de captaciones subterráneas a partir de los antecedentes de catastros de agua de la DGA (feature class Catastro_DGA_QSOL y Catastro_DGA), polígonos con áreas de isoprofundidades del nivel estático (feature class Isoprofundidad_Acuífero), y feature class complementarios.
7	Hidrogeología (Figura 10)	Cobertura de polígonos con la distribución de unidades hidrogeológicas (feature class Unidades hidrogeológicas), polilíneas con información piezométrica (feature class Isofreaticas_Acuifero_itata), puntos con antecedentes de pozos (feature class Catastro_DGA_QSOL y Catastro_DGA), polígonos de Subcuencas (feature class Subcuencas_Generadas) y feature class complementarios.
8	Profundidad de basamento (Figura 11)	Cobertura ráster con profundidad de basamento (feature class Prof_basamento.tiff) y feature class complementarios.
9	Transmisibilidad (Figura 12)	Cobertura de polígonos con isovalores de transmisibilidad (m^2/día) (feature class Transmisibilidad_Acuífero_itata, cobertura de puntos con localización de pozos (Pozos transmisibilidad) con valores de Transmisibilidad y feature class complementarios.
10	Sectorización definitiva (Figura 13)	Cobertura de polígonos con los sectores acuíferos definidos en este estudio (feature class Sectorización_definitiva) y feature class complementarios.
11	Vínculos (Figura 13)	Cobertura de localizaciones con los sentidos de flujo que vinculan hidrogeológicamente los sectores definidos (feature class Vínculos) y feature class complementarios.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Combinando una serie de parámetros hidrogeológicos fue posible establecer una propuesta de sectorización para el acuífero asociado al río Ñuble con 14 sectores definidos sobre la base de: localización y distribución de unidades hidrogeológicas y solicitudes de derechos de agua, dirección de los flujos subterráneos, geometría acuífera y morfología de basamento, distribución de valores de transmisividad y vínculos entre sectores.

Respecto del proceso de sectorización acuífera, se considera relevante aplicar la metodología de sectorización de acuerdo al nivel de información disponible para un determinado sector y a las respuestas que requiera abordar quien necesite efectuar esta sectorización. Para el caso de la DGA, es relevante concentrar los estudios en zonas donde se deba resolver la asignación de solicitudes de derecho. En la medida en que se disponga de más información, será posible llevar a cabo una definición cada vez más detallada de la sectorización.

Por otro lado, un excesivo y detallado nivel de información podría derivar en una sectorización con numerosas áreas de pequeñas dimensiones y cuestionable uso práctico, transformando este instrumento en una metodología compleja y de escasa aplicación práctica. Sin embargo, es posible que exista información que resulte relevante al momento de analizar casos particulares, que sí deberá considerarse. Por otra parte, las extracciones de agua subterránea resultan ser también factores determinantes en el desplazamiento de divisorias de aguas subterráneas o en la propagación de efectos de un sistema a otro, por lo que también deben evaluarse cuidadosamente.

Considerando la necesidad que tiene la DGA para responder a las demandas por derechos de agua del acuífero que realmente se utiliza y dado que este puede presentar diferentes características en profundidad o en nuevas áreas de exploración, será necesario actualizar la sectorización acuífera en los casos que se exploten nuevos o más profundos niveles acuíferos. De esta forma una caracterización de estos nuevos sectores del acuífero resultará necesaria y razonable de incluir en un nuevo análisis. Sin embargo, cuando esta explotación no sea de relevancia, se debe analizar si corresponde realizar una nueva sectorización. A pesar de ello, en el largo plazo resulta muy conveniente considerar toda información relevante para la asignación de derechos de agua.

En particular, para el área de estudio, con un mayor detalle de la topografía e hidrografía de los terrenos con bajo contraste de alturas es posible establecer una mejor definición de las subcuencas hidrológicas. Sin embargo, para el caso estudiado, se considera que esta delimitación no constituye un límite relevante al momento de sectorizar el acuífero al estar este hidrogeológicamente conectado al interior de cuencas de mayores dimensiones, desconocer la dinámica de los flujos subterráneos en la zona no saturada y el efecto de los numerosos canales de regadío y drenaje que existen en el área de estudio.

Respecto del estudio geofísico efectuado, en términos generales, la prospección electromagnética mediante TEM, en combinación con el estudio gravimétrico realizado, permitieron mejorar el conocimiento y la caracterización de la geometría acuífera del área

estudiada. La modelación gravimétrica fue calibrada adecuadamente con los datos de las estaciones TEM en la parte occidental y central del área estudiada.

Debido a las limitaciones referidas a la profundidad de investigación del método TEM, en la parte central y oriental de la cuenca estudiada, el basamento acuífero no queda correctamente acotado. Para estos sectores se propone una profundidad de basamento aproximada producto de la modelación de gravedad en combinación con la información del levantamiento TEM. Este problema es posible de resolver mediante el uso del método magneto-telúrico (MT). La correcta aplicación de este método que permite alcanzar mayores profundidades no requiere considerar el mismo número de estaciones TEM ya ejecutadas. Una estrategia a desarrollar consiste en levantar 10 a 20 estaciones MT en puntos específicos y distribuidos coherentemente de acuerdo a la necesidad de alcanzar el basamento impermeable. Una vez reconocidos los dominios en los cuales la gravedad muestra la presencia de depocentros de varios cientos de metros de potencia y donde las estaciones o perfiles TEM no son capaces de detectar basamento producto de la presencia de un dominio conductor (parte central y oriental del área), se recomienda ubicar estaciones MT de tal forma de determinar en forma adecuada la profundidad al basamento. Una vez efectuado el estudio MT se puede recalibrar la gravedad para acotar en mejor forma la profundidad al basamento hidrogeológico.

En los casos en que la profundidad al basamento del acuífero, la cual no necesariamente debe ser roca cristalina, es conocida íntegramente mediante una combinación de los estudios TEM y MT, y eventualmente sondajes, se puede intentar efectuar una modelación de gravedad con variación de la densidad en profundidad lo cual puede redundar en una mejor definición areal de la profundidad del basamento y en una estimación de las porosidades en el relleno.

Se debe señalar que con el diseño de levantamiento TEM con loop de 200x200 m exigido para este estudio, no fue posible resolver geoeléctricamente los niveles más superficiales. Para resolver en forma adecuada los primeros 40 m de la sección geoeléctrica es necesario utilizar un loop de menor tamaño, idealmente de 50x50 m. Si bien se dispone de información de pozos para caracterizar hidrogeológicamente los niveles más someros, la información geoeléctrica de estos niveles más someros en conjunto con su equivalente más profundo, permitirá generar una mapeo geoeléctrico con mejor resolución en profundidad de acuerdo al muestreo TEM.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguirre, I.; Iriarte, S. 2004. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la región del Biobío. 2 mapas escala 1: 250.000, 25 p. Gobierno de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) − Comisión Nacional de Medioambiente (CONAMA).

2. AQUATERRA, 2011. Estudio hidrogeológico cuencas Bíobío e Itata. Cuenca Itata. Tomo I, Informe final. S.I.T Nº 258. AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA.

3. CADE-IDEPE, 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, cuenca río Itata. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas.

4. GCF INGENIEROS LTDA, 2014. Manual de aplicación de la metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos. S.I.T. N° 341.

5. INH, 2014. Informe Estudio Hidrogeológico. Proyecto Innova CORFO COD. 12BPC2-13473. Etapa I − Desarrollo del bien público. "Construcción del modelo hidrogeológico y propuestas de medidas de mitigación". 165 p. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Instituto Nacional de Hidráulica.

6. TRV, 2013. Estudio geofísico de Transiente Electromagnético (TEM) para Modelo de evaluación de la vulnerabilidad del Recurso Hídrico Subterráneo para uso agropecuario Estudio realizado para informe INH, 2014

7. SERNAGEOMIN, 2002. MAPA GEOLÓGICO DE CHILE. Escala 1:1.000.000. Gobierno de Chile. Ministerio de Minería. Servicio Nacional de Geología y Minería.

8. Struckmeier, W., Margat, J. 1995. Hydrogeological Maps. A guide and a standard legend. International Association Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology, Vol. 17. Hannover, Alemania.

9. Tassara, A., Yáñez, G. 2003. Relación entre el espesor elástico de la litósfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47°S). Revista Geológica de Chile, Vol. 32, p. 159-186.

ANEXOS

ANEXO N°1. LEVANTAMIENTO GEOFÍSICO DE TRANSIENTE ELECTROMAGNÉTICO Y GRAVIMETRÍA PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SECTORIZACIÓN DEL ACUÍFERO DEL RÍO ÑUBLE.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra los resultados del levantamiento y procesamiento de antecedentes geofísicos levantados para el estudio formulado por la DGA (Licitación ID: 1019-10-LE15) y denominado ANÁLISIS Y APLICACIÓN METODOLOGÍA PARA LA DELIMITACIÓN Y SECTORIZACIÓN DE ACUÍFEROS EN LA PROVINCIA DE ÑUBLE, VIII REGIÓN.

Durante el transcurso del trabajo se mantuvo permanente comunicación con la Inspección Fiscal de la DGA encargada de este estudio. Con esto fue posible acordar el área definitiva para la aplicación de la metodología de sectorización y la localización de las estaciones geofísicas utilizando las técnicas de prospección geofísicas conocidas como transiente electromagnético (TEM) y gravimetría.

La campaña geofísica se planificó con el fin de aprovechar los recursos disponibles para costear estos levantamientos al interior del área con mayor demanda administrativa para la DGA. El área finalmente seleccionada está al interior de un grupo de subcuencas hidrográficas que subterráneamente incluyen un área acuífera relativamente homogénea, definida esencialmente por la delimitación de los flujos de agua subterránea.

De esta forma, las estaciones y perfiles geofísicos fueron localizados con el sentido de aprovechar la información geofísica para sectorizar el acuífero y con el objeto de generar nuevos antecedentes que permitan mejorar el conocimiento del balance hídrico de ésta área, como base de conocimiento técnico para establecer los recursos hídricos. Estos antecedentes definieron la orientación y localización de los perfiles geofísicos acordados con la DGA. La Figura Anexa 1 incluye todas estas ubicaciones además de la traza e información de los pozos utilizados en el estudio de Aquaterra (2011) para la interpretación de la estratigrafía de la cuenca.

Se ejecutó un total de al menos 81 estaciones TEM y 141 estaciones gravimétricas localizando cada estación gravimétrica en una ubicación similar a la de las estaciones TEM. Las estaciones gravimétricas restantes se ubicaron en un perfil longitudinal atravesando la depresión central en sentido WE. Las estaciones TEM, en general, se ubicaron en perfiles de cuatro a seis u ocho estaciones TEM contiguas, abarcando longitudes de aproximadamente 1 km con estaciones separadas cada ~200 m de cada punto central y loops individuales de 200x200 m.

EN el Anexo N°2 se presenta toda la información geofísica levantada tanto en terreno como aquella generada durante el procesamiento de la misma.

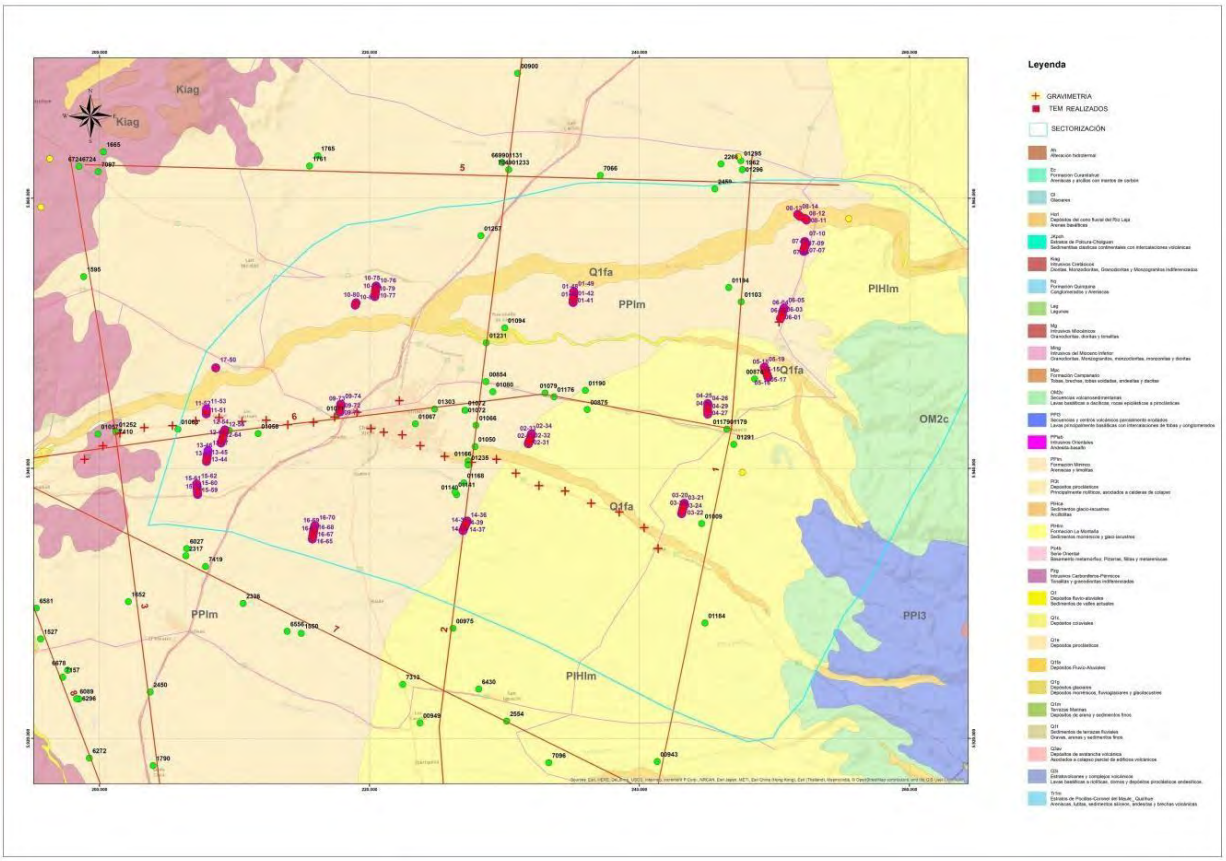


Figura Anexa 1. Localización de las estaciones de adquisición de datos geofísicos. En violeta se indica N° de Perfil TEM - N° de TEM. Símbolo "+" en rojo se indica la ubicación de las estaciones gravimétricas. Líneas rojas y puntos verdes, información estratigráfica de Aquaterra (2011).

2. TRANSIENTE ELECTROMAGNÉTICO (TEM)

2.1. TRABAJO DE TERRENO

Los trabajos de terreno comenzaron a fines de Julio de 2015, realizando una visita a terreno para solicitar los permisos de accesos y visualizar las condiciones de los terrenos. Los levantamientos TEM propiamente tal se realizaron la primera semana de Agosto de 2015. Al 11 de agosto de 2015, debido esencialmente a factores climáticos solo se han podido realizar 24 levantamientos de estaciones TEM (Figura Anexa 1). Se propone ejecutar un número no menor de estaciones gravimétricas y de TEM adicionales a las 70 estaciones requeridas en las bases de licitación de este estudio. La ubicación de los perfiles y estaciones geofísicas planteados se muestran en la figura 7. Sin embargo, se destaca que se está realizando el mayor esfuerzo para poder avanzar con esta propuesta, pero se debe tener presente que el total de estaciones a levantar al final de este estudio

dependerá de los avances diarios de acuerdo a los accesos y permisos disponibles, estado de los terrenos, condiciones climáticas y plazos designados para la ejecución de este estudio. Estos levantamientos se esperan finalicen lo antes posible de manera de realizar las inversiones y modelos geofísicos correspondientes, de tal forma de integrar esta información a la sectorización definitiva de ésta área de interés.

2.1.1. Instrumentación y loop utilizado

Para el levantamiento TEM se utilizó el siguiente equipó de terreno

- 1 Transmisor FastSnap TEM System
- 1 Receptor FastSnap TEM System
- 1 Software de proceso e inversión FastSnap TEM System Model 3
- 3 baterías de 12 V
- 1-2 Camioneta de apoyo 4x4
- Cable eléctrico N°10
- Equipo de apoyo: computadores PC-Notebooks, Radios de comunicación, estacas y banderines para identificar los extremos de loops.

En todo el trabajo el método TEM fue aplicado con la configuración de Central Loop. Cada loop fue construido con los cables eléctricos disponibles para ello formando un cuadrado de modo que el lugar de lectura (lugar donde se ubica la bobina de recepción y el receptor) fuese el centro de un loop cuadrado de 200mx200m. En cada punto de lectura fueron registrados los datos del decaimiento del voltaje para diferentes discretizaciones 25 ns, 100 ns, 800 ns y 6,4 microsegundos.

2.1.2. Generalidades del método TEM

La técnica de prospección geofísica denominada TEM (Transiente electromagnético), puede ser descrita como el análisis de la función de decaimiento en el tiempo de un campo magnético estable, al que se le interrumpe súbitamente la corriente que lo genera.

Esta función o respuesta transiente es la forma como un sistema físico reacciona a una perturbación antes de alcanzar un nuevo estado de equilibrio.

La respuesta transiente depende de los parámetros eléctricos que caracterizan el subsuelo. El análisis de esta respuesta en una serie de instantes de tiempo permite inferir información cuantitativa a cerca de esos parámetros.

El principio de operación de un sistema TEM, en prospección geofísica, consiste en energizar un loop de cable aislado puesto en la superficie del terreno o alternativamente un dipolo conectado a tierra. Esta acción induce en el subsuelo corrientes de conducción de electrones libres, las cuales dependen de la conductividad, tamaño, y forma de las unidades eléctricas del subsuelo.

El mecanismo físico por el cual las corrientes inducidas se distribuyen en un medio geoeléctrico puede ser descrito como difusión. Al interrumpirse el campo magnético primario, las corrientes inducidas tienden a difundirse radialmente hacia el centro de los sectores subsuperficiales más conductores. La velocidad con que estas corrientes se disipan depende de la conductividad del medio. Si la conductividad es alta, el proceso de difusión será lento y las corrientes permanecerán mayor tiempo en la superficie de los cuerpos conductores. Por el contrario, si la conductividad es baja, las corrientes penetran el subsuelo más rápidamente.

La forma de onda que se envía mediante el loop transmisor es de forma cuadrada y toma sucesivamente valores positivo nulo negativo nulo - positivo, por intervalo iguales de tiempo. El receptor se activa en los intervalos en que la corriente en el loop es nula. Este procedimiento es repetitivo, realizando el receptor procesos de acumulación y cálculo del promedio de los valores que mejoran considerablemente la relación señal/ruido.

2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS

A continuación se describe el procesamiento de datos efectuado mediante TEM-Processing 1.0. En primer lugar, se hace un stacking de todas las mediciones obtenidas en cada punto (100 pulsos). Esto con el fin de reducir el ruido y la dispersión de los datos, mediante estadística.

Luego, con el resultado del stacking se obtiene la curva final de decaimiento de voltaje, a partir de curvas generadas para distintas frecuencias. Esta curva final es la que posteriormente se modela.

En la presentación de la información se utilizó el software proporcionado por los fabricantes de los equipos, el software geofísico gráfico de Geosoft y uno creado para estos efectos.

2.2.1. Ubicación

Al final de la jornada de trabajo, los datos registrados con GPS a partir del receptor del equipo TEM. La ubicación de estos puntos se muestra en la Figura 1 y las coordenadas UTM referidas al Datum WGS84 de estos puntos se muestra en y se incluyen en el respaldo digital de este informe.

2.2.2. Reducción de datos

En cada sondeo TEM fueron registrados dos o más datos para cada frecuencia. Mediante el uso de un software proporcionado por el fabricante de los equipos se traspasan los datos TEM desde el receptor hasta un computador. El primer proceso que se realiza es organizar los datos, para posteriormente promediar los datos de un mismo sondeo y de una misma frecuencia.

La primera tarea que se desarrolla es la edición de las curvas de resistividad medida versus tiempo. Los datos se editan (limpian) para eliminar el ruido que se registra junto con el voltaje de decaimiento. Se enmascaran (no se consideran) los datos al inicio de la curva (extremo superior izquierdo) con los que no fue posible discriminar en resistividad los primeros metros (30-40 m). De igual forma, los datos obtenidos con la frecuencia más baja fueron enmascarados (no considerados) cuando registraron más ruido que señal.

2.2.3 Modelamiento

En este trabajo para realizar el modelamiento o modelización de los datos de TEM se ha utilizado el software del fabricante del equipo TEM.

2.2.3.1. Modelación 1D e inversión (Model 3.0)

Para cada punto, se procede a generar un modelo de capas que genere una respuesta en voltaje lo más parecida posible a la curva medida. Para esto se utiliza el módulo de inversión del software que genera distintas soluciones hasta converger a una solución. El software itera, a partir de una solución inicial, hasta encontrar una configuración que genere una respuesta similar a la medida, con un error que es conocido. El modelo final se obtiene repitiendo el proceso, mejorando la solución inicial, hasta alcanzar un error aceptable. Con los datos editados se procedió a obtener los modelos 1D para cada sondeo TEM los cuales se muestran en de manera Anexa en la Base de Datos.

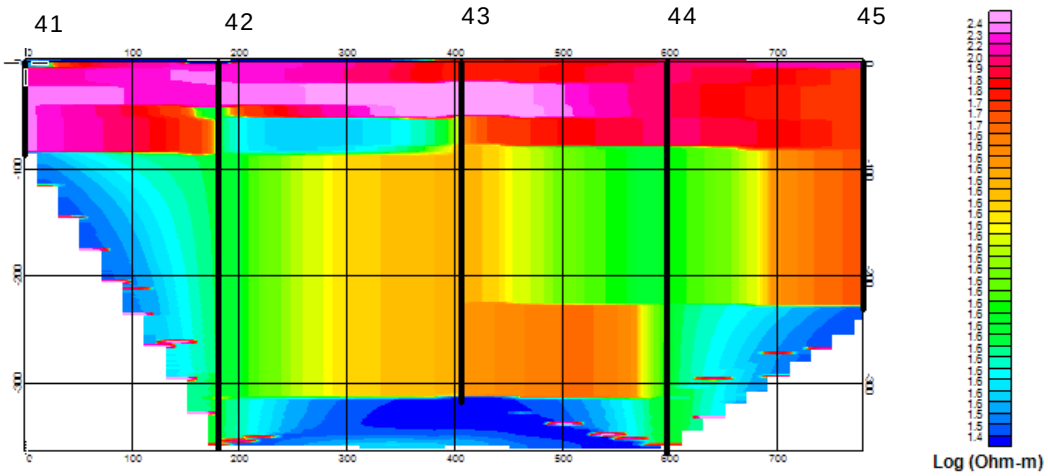
Las estaciones TEM-60 y TEM-68 presentaron errores de medición, por lo que su interpretación es complicada; sin embargo los modelos 1D fueron reconfirmados. La curva de la estación TEM-56 no se procesó porque la medición solo entregó ruido. La curva de la estación TEM-40, presentó alta dispersión en los primeros tiempos, y la curva que se entrega fue lo mejor que se pudo lograr; la modelación intenta en este caso, seguir la tendencia. Ese punto no se puede mejorar más. La estación TEM-2, se efectuó en una ubicación similar a la estación TEM-2 como medida de control producto de las condiciones de inundación y anegamiento del terreno que existieron durante el primer levantamiento TEM.

2.2.3.2. Modelación 2D

Una vez que cada sondeo TEM fue modelado (invertido) individualmente se procedió a preparar secciones de resistividad v/s profundidad para cada Perfil TEM. Para ello, se procede a armar los perfiles 2-D, utilizando una rutina en MatLab. De esta forma se calcula una grilla con los valores de resistividad y profundidad. Este proceso permite disponer los modelos a lo largo de un eje horizontal en la dirección de los puntos medidos, e interpola en las zonas sin datos y así obtener una sección 2D de resistividad a partir de los modelos unidimensionales de resistividad y profundidad. En un primer lugar, lo hace desde una cota cero, y posteriormente lo inclina con las cotas de cada punto. La orientación del perfil, es desde el primer punto medido hasta el último, por lo que no hay una orientación preferencial.

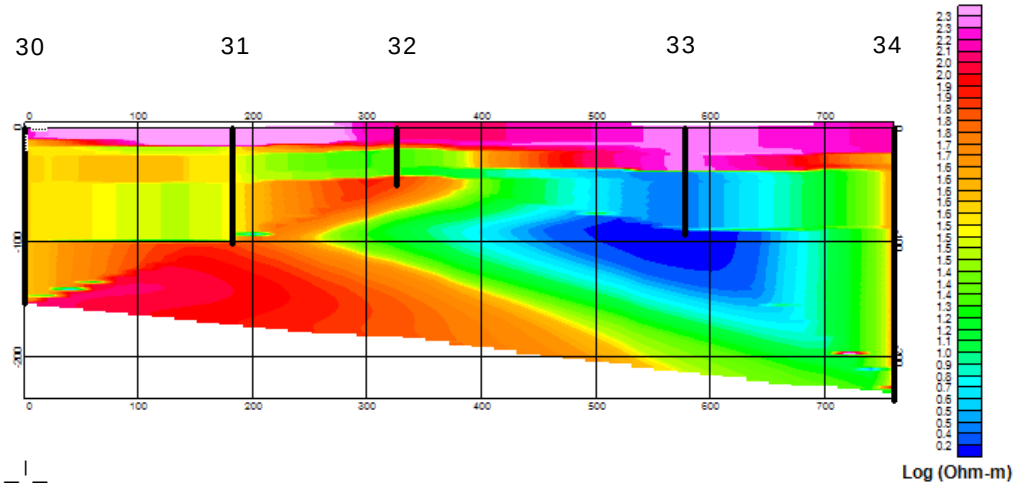
A continuación se muestran los resultados de la inversión de datos de cada TEM agrupados en los perfiles TEM 1 al 16 (Figura Anexa 1). La línea vertical de color negro indica la ubicación de cada TEM en el perfil y la profundidad de esta línea indica profundidad de investigación. Se incluye en cada perfil los valores de espesores y resistividades verdaderas resultantes de los modelos de inversión 1 D.

Perfil 1



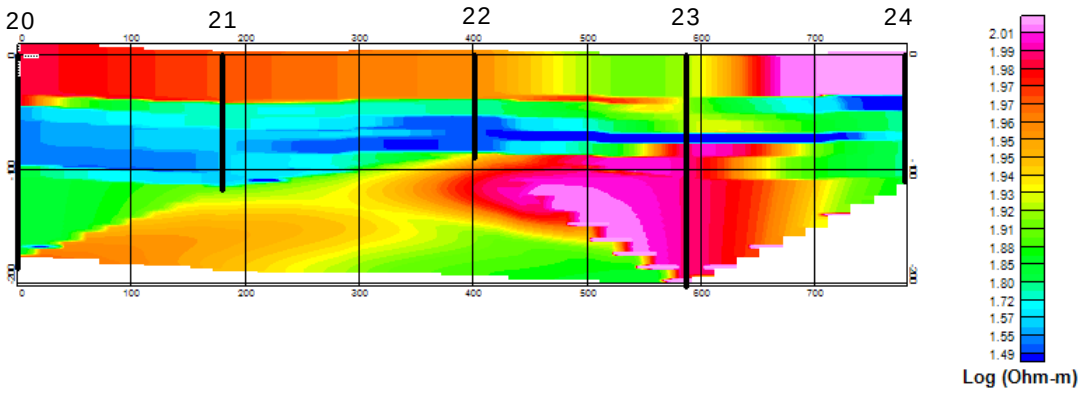
40* (ruidoso)		41		42		48		49	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
7,4	33,6	1	4,7	21,7	55,7	80,3	78,2	5,8	164,3
17,5	125,2	41,6	193,4	31,8	411,6	282,2	42,9	223,1	45,6
61,4	212,7	316,5	42,5	262	43,9	semi	18,3	semi	25,6
semi	34,1	semi	24,1	semi	24				

Perfil 2



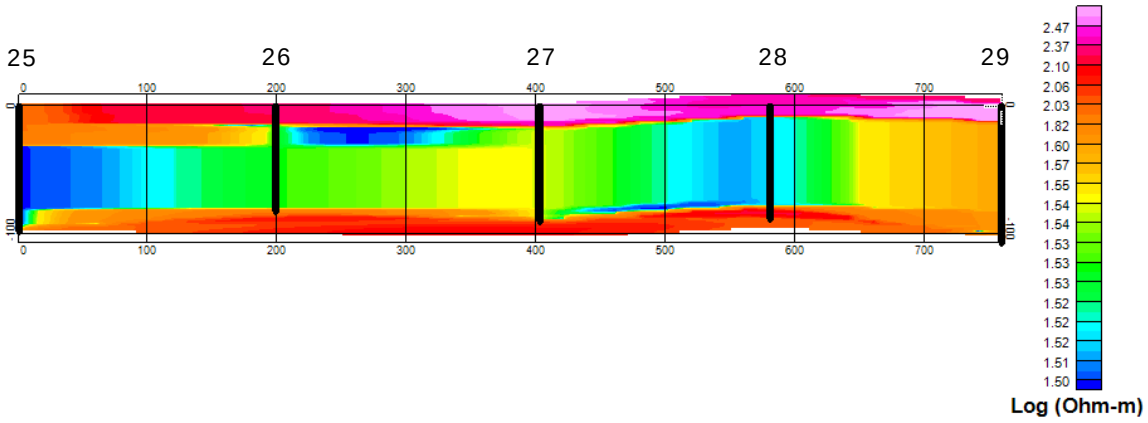
30		31		32		33		34	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
9,3	169,8	15,4	476,2	19,9	136,9	40,4	184,8	26,4	155,4
143,2	36,4	84,4	34,8	4,8	60	51	2,7	10,5	35,1
semi	111,5	semi	68,5	23,5	21,2	semi	1,1	199,9	47,1
				semi	75,1			semi	18,8

Perfil 3



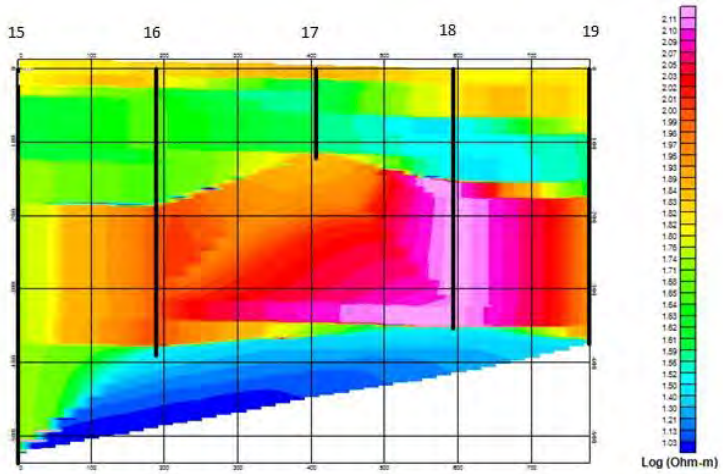
20		21		22		23		24	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
57,6	95,7	45,4	93,2	42,9	90,8	45	83,2	37,16	153,1
71,5	34,4	22,3	53,5	13,9	60,1	14,3	300	13,3	21
48,2	304	49,6	35,4	32,1	32,3	7,6	10,6	59,4	58,9
semi	67,7	semi	81	semi	84	semi	78	semi	69,8

Perfil 4



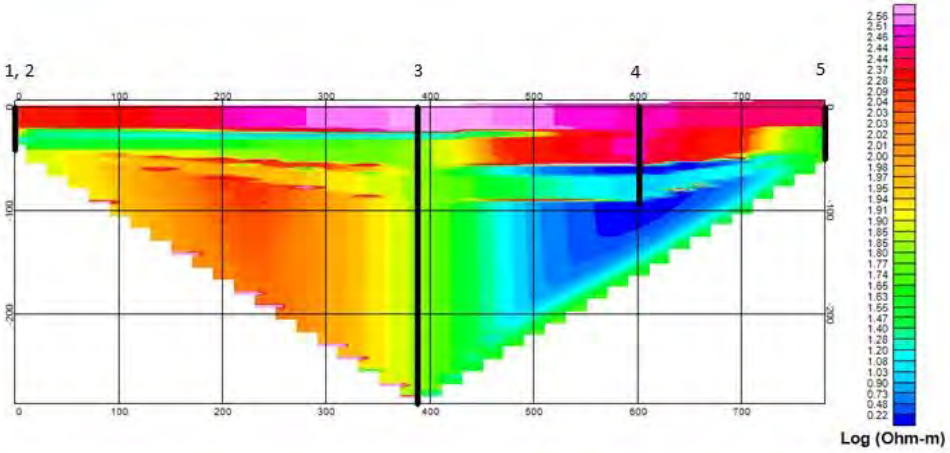
25		26		27		28		29	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
20,5	99,2	7,7	207,5	12,6	333,8	9,4	242,9	3,3	207,8
10,9	80,1	7,8	190,9	5,1	248,1	8,6	278,2	13,6	399,7
65	31,9	65,8	33,8	70,7	34,5	68,4	32,8	88,8	40
semi	97,3	semi	83,9	semi	109,4	semi	100,3	semi	89,1

Perfil 5



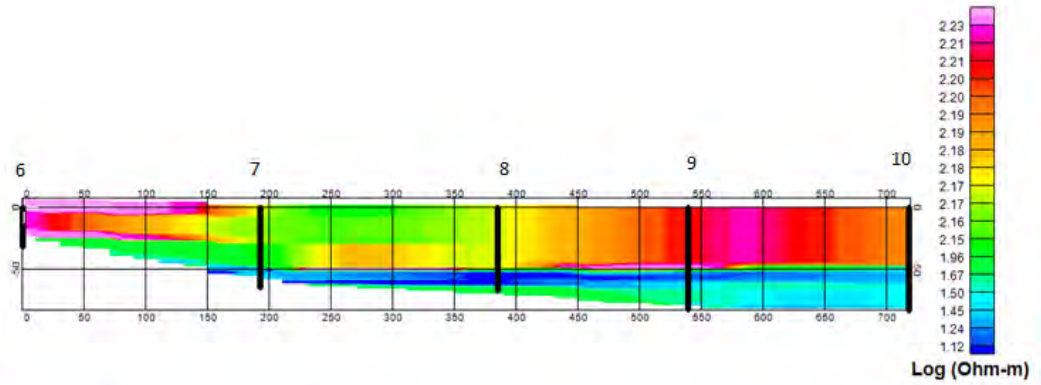
15		16		17		18		19	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
48,1	65,3	35,8	66,9	20,9	69,7	65,1	65,6	90,6	66
135,5	41,4	160,2	43,8	99,9	38,7	87,8	31,7	86	37,2
198,1	85,3	192,3	98,5	semi	70	198,3	130,7	196,7	90
semi	32,3	semi	35,7			semi	32	semi	27,8

Perfil 6



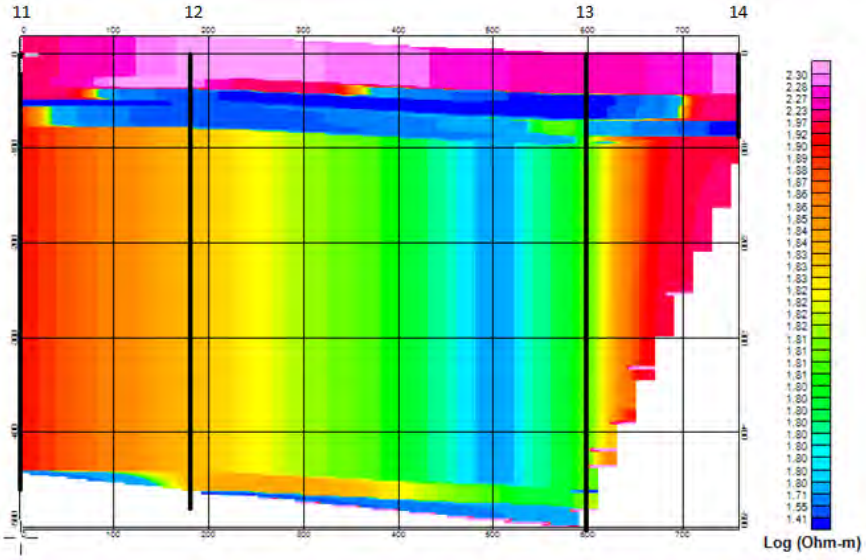
1		2		3		4* (medicion distinta)		5	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
29,6	109,8	20	160	25,8	373,2	58,8	281,322	25,24	275,6
4,6	13,56	14,6	25,4	5,2	13,1	8,5	1	24	32,2
1	10,7	6,5	34,1	254	66,4	25,6	10,8	semi	77
semi	68,8	semi	71,6	semi	18,8	semi	1		

Perfil 7



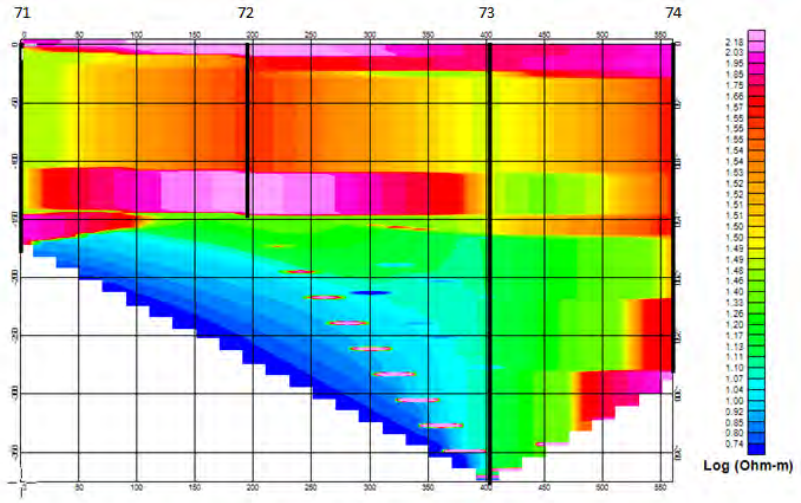
6		7		8		9		10	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
53,4	144,6	54,7	148,5	52,1	161,2	47,3	155,2	10,2	215
8,1	20,8	11,7	12,65	7,9	14,3	14	23,4	15,9	162
2,1	12,6	semi	71,3	21,7	32,1	21,4	30,6	5,6	186
Semi	68,1			semi	72,5	semi	76,7	semi	65

Perfil 8



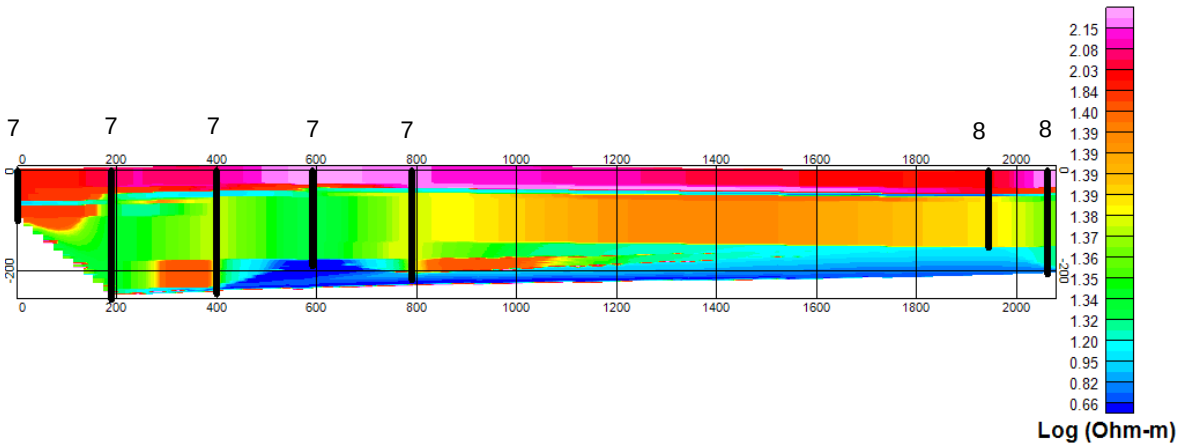
11		12		13		14	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
66,8	158,1	54,7	202,8	43	183,9	70,2	196,1
6	6,7	39,8	28,3	26,8	21,9	17,1	17,7
386,4	78,6	384,5	68,2	431,6	63,9	semi	87,1
semi	38,9	semi	18,6	semi	23,1		

Perfil 9



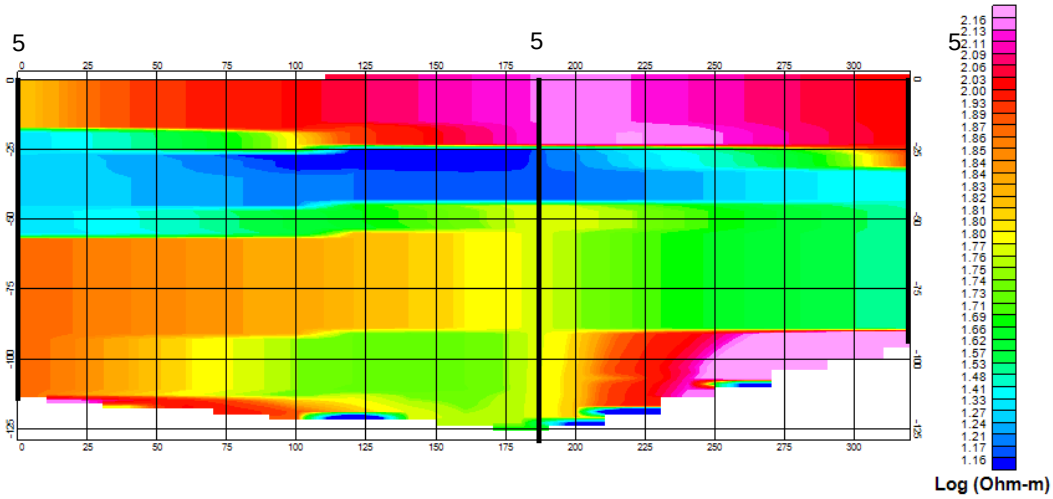
71		72		73		74	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
5,5	91	9,5	208,2	20,6	67	27,3	107
144	30	101	35,5	135,7	31	191,3	36,6
25,7	102	35	163	110,9	16,1	69,5	52,4
semi	7,3	semi	22,8	semi	13,3	semi	150

Perfil 10



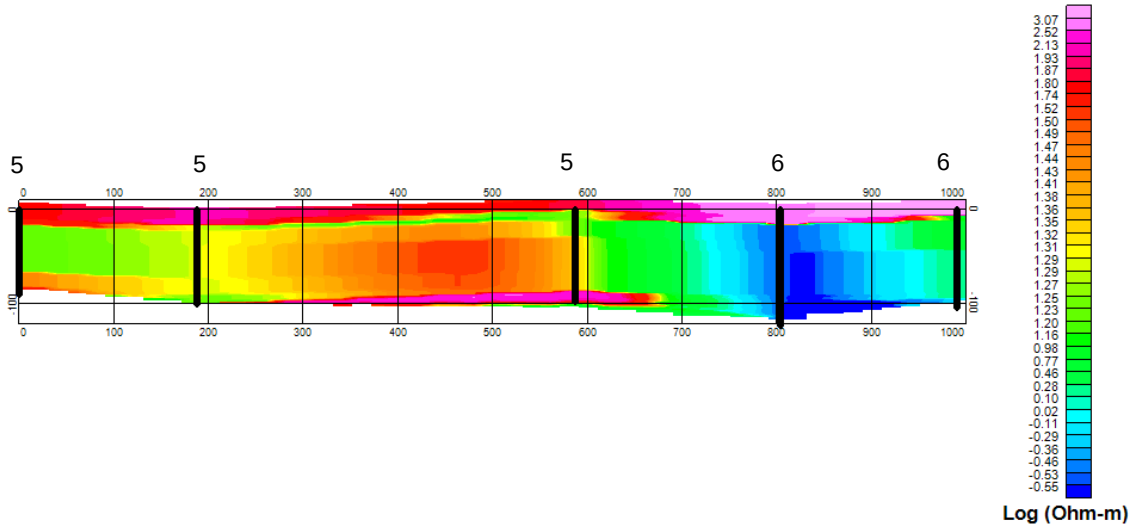
75		76		77		78		79		80		81	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
64,2	78,4	41,7	119,6	49,7	118,1	9,6	127,6	10,2	132,9	45,3	107,5	24,5	309,2
8,4	7,5	15	29,5	11,2	10,7	34,4	170,4	31,6	183,1	8,7	10,2	14,9	47,9
24,6	70,5	semi	22,7	182,6	23,8	31,8	19,9	19	20,7	semi	24,9	31,7	21,2
semi	25,3			semi	4,8	semi	29,3	semi	26,5			semi	27,3

Perfil 11



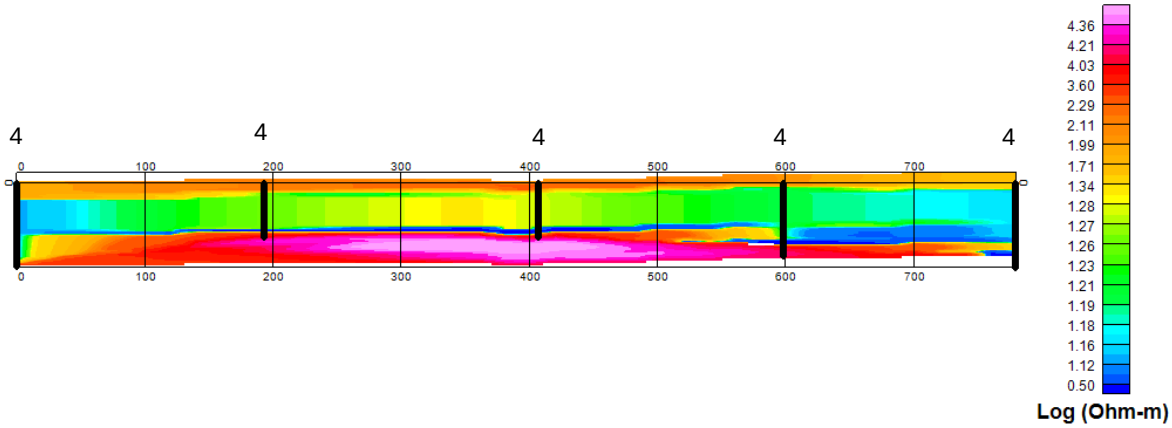
51		52		53	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
18,9	64,8	26,6	135,9	33,1	96,3
36,9	18,8	19,9	14,6	59,22	27,5
57,3	73,7	81,7	58,5	semi	742
semi	164,8	semi	311,8		

Perfil 12



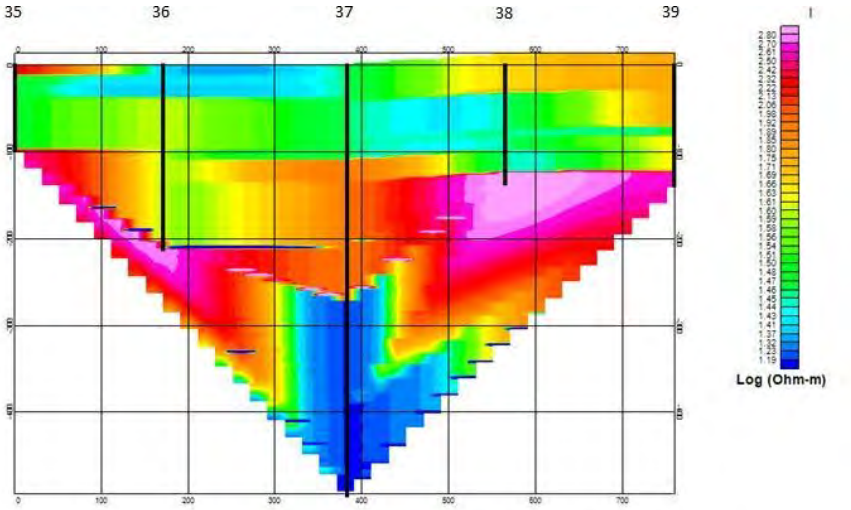
54		55		57		63		64	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
22,9	55,6	17,2	86,9	11,8	68,8	1	999,12	15,79	1605,92
50,3	15,8	73,2	19,6	27	17,3	19,34	952,7	34,85	6,82
16	27,8	8,6	17,9	58,2	22,2	101,64	0,29	52,79	2,08
semi	47,3	semi	100,7	semi	249,7	semi	1,1	semi	0,62

Perfil 13



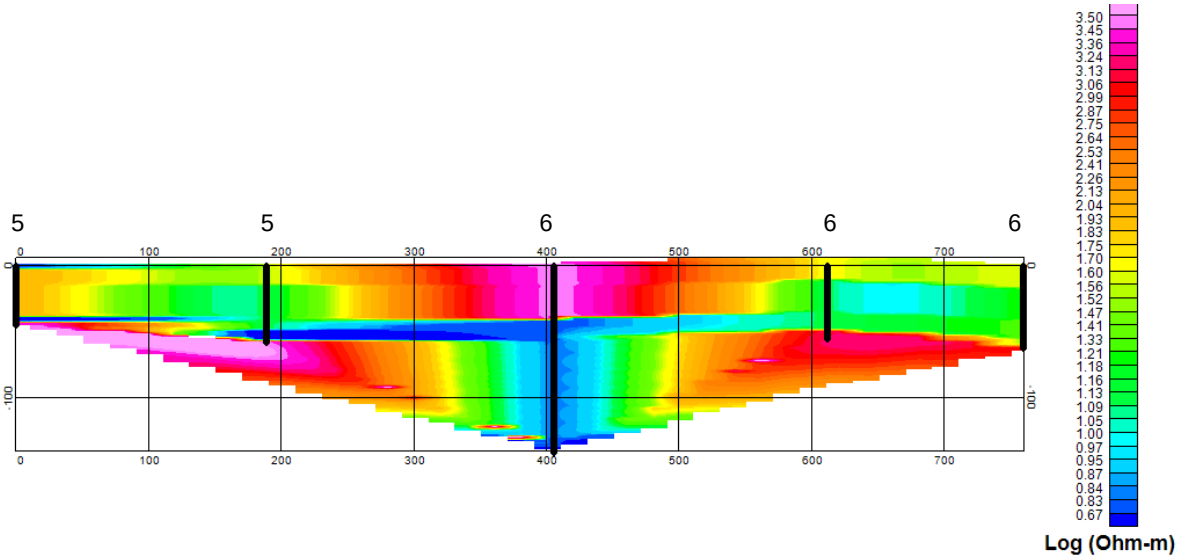
43		44		45		46		47	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
12,6	88,3	9,4	8,4	11,5	115,5	8,3	114,1	13	31,6
51,3	13,7	29,9	18,1	6,9	8,4	39,9	15,8	49,3	14,5
semi	1200	2,5	1,4	15,9	969	3,1	511,1	3	1
		semi	2000	4,5	1,7	5,4	2,22	semi	4719
				semi	5000	semi	5000		

Perfil 14



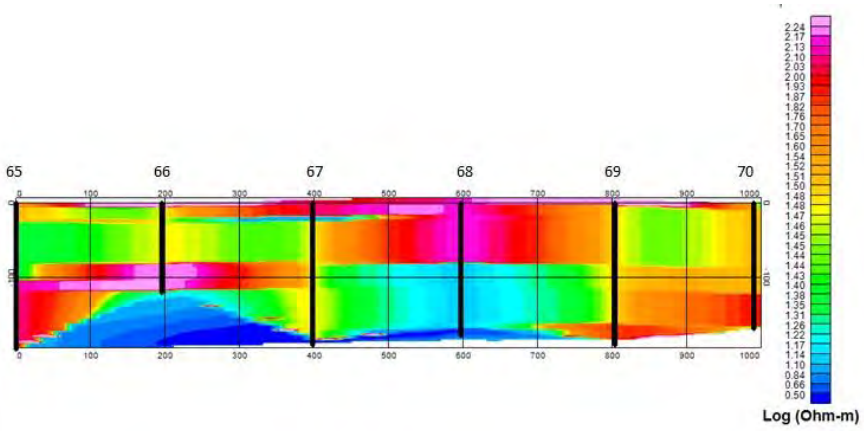
35		36		37 *		38		39	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
11,1	193,6	23	25,6	4,5	29	38,3	46,6	84,8	59,2
85,9	30,4	13,7	23,8	104,1	28,7	4,3	54,1	10,6	28,7
semi	304,2	173,6	39	162,3	82,4	92,6	28,3	42,2	44,8
		semi	600	222,9	15,2	semi	736	semi	500
				semi	34				

Perfil 15



58		59		60		61		62	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
2,7	5,8	14,4	34,7	40,5	3008,9	16,8	44,8	17	39,7
35,5	85,4	34,9	12,8	99,3	6,7	37,8	12,6	44,8	17,3
5,5	2	7,8	3,4	semi	2	semi	1223,5	semi	1053,8
semi	2757,4	semi	3003						

Perfil 16



65		66		67		68*		69		70	
H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)	H (m)	rho (ohm-m)
28,2	32	5,7	1395	22,1	109,4	7	136,7	9	502,8	7,7	21
68	22,1	72,9	29,5	5,9	8,5	81,1	140,3	158,8	30,6	113,4	32,7
42,2	227,5	26,8	737,6	160,8	29,9	87,6	13,5	21,6	68,4	45,7	91,7
semi	37	semi	25,9	semi	2,4	semi	3,9	semi	20,3	semi	22,3

3. GRAVIMETRÍA

El presente trabajo incluye información geofísica mediante los levantamientos de gravimetría efectuados para el presente estudio y la gravimetría levantada por el estudio de Aquaterra (2011).

3.1. TRABAJO DE TERRENO

3.1.1. Instrumentación utilizada

El equipamiento utilizado durante el levantamiento de terreno fue el siguiente:

- Gravímetro Scintrex CG5
- GPS TRIMBLE R4 Doble Frecuencia
- 1 vehículo tracción simple y un vehículo 4x4 (uso alternado)
- 1 libreta de terreno
- 1 GPS Navegador
- Equipo de apoyo: computadores PC-Notebooks, etc.

3.1.2. Generalidades del método gravimétrico

La gravimetría es un método que ha sido utilizado en diferentes campañas de exploración de recursos minerales y también en la exploración de aguas subterráneas. Este método aproveche las diferencias de la gravedad en distintos sectores. Los contrastes de densidad de los materiales que conforman el suelo y el subsuelo caracteriza la gravitación en una región determinada porque rocas de mayor densidad aumentan la aceleración, y por el contrario las de menor gravitación la disminuyen.

El campo de potencial natural observado se compone de los contribuyentes de las formaciones geológicas, que construyen la corteza terrestre hasta cierta profundidad determinada por el alcance del método gravimétrico. Generalmente no se puede distinguir las contribuciones a este campo proveniente de una formación o una estructura geológica de aquellas de las otras formaciones o estructuras geológicas por el método gravimétrico, solo en casos especiales se puede lograr una separación de los efectos causados por una formación o estructura geológica individual.

Se realizan mediciones relativas de las variaciones laterales de la atracción gravitatoria de un lugar al otro. Los datos reducidos apropiadamente entregan las variaciones en la gravedad, que solo dependen de variaciones laterales en la densidad del material ubicado en la vecindad de la estación de observación.

Una anomalía de gravedad se define como la variación de los valores medidos de la gravedad con respecto a la gravedad normal después de haber aplicado las correcciones necesarias.

La anomalía de aire libre resulta de las correcciones de la influencia de las mareas, de la derive del instrumento de medición, de la latitud y de la altura. La anomalía de Bouguer se obtiene aplicando todas las correcciones mencionadas.

3.2. PROCESAMIENTO DE DATOS

3.2.1. Ubicación

A continuación se indican separadamente y luego en conjunto, la ubicación de las estaciones medidas en este estudio y la gravimetría presentada en el estudio de Aquaterra (2011).

3.2.1.1 Datos existentes

Se dispone de los datos provenientes de campaña gravimétrica correspondiente al estudio realizado por Aquaterra Ingenieros Limitada de 2011. En total 343 estaciones distribuidas principalmente por caminos (Figura Anexa 2).

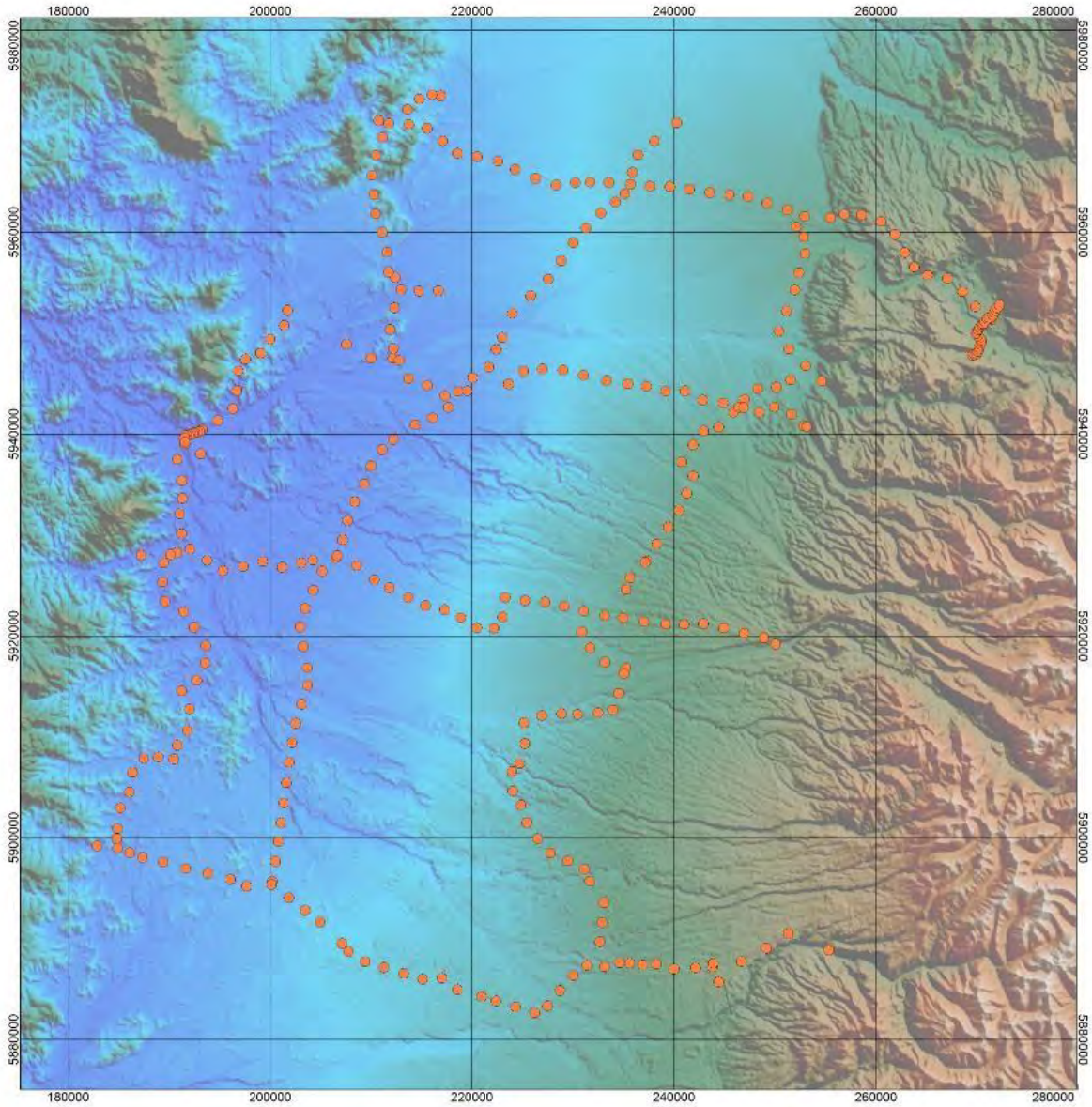


Figura Anexa 2. Ubicación de estaciones de gravedad previas.

3.2.1.2. Campaña de Gravedad 2015

La campaña de gravedad en este proyecto se llevó a cabo entre el 16 de Agosto y el 20 de Agosto del año 2015. En total se midieron 124 estaciones de acuerdo a la distribución indicada en Figura Anexa 3. Para obtener valores de gravedad absoluta se efectuó un traslado de base desde el valor absoluto de la Pontificia Universidad Católica (PUC: 979505,016 mGal), hasta el punto base utilizado en Chillan (Base Chillán, 979819,83 mGal, coordenadas: 72,105475°W; 36,600057°S).

Para las mediciones de gravedad se utilizó un gravímetro Scintrex CG5 de precisión 0,001 mGal. Las mediciones de cota fueron realizadas utilizando un sistema GPS diferencial marca Trimble de doble frecuencia.

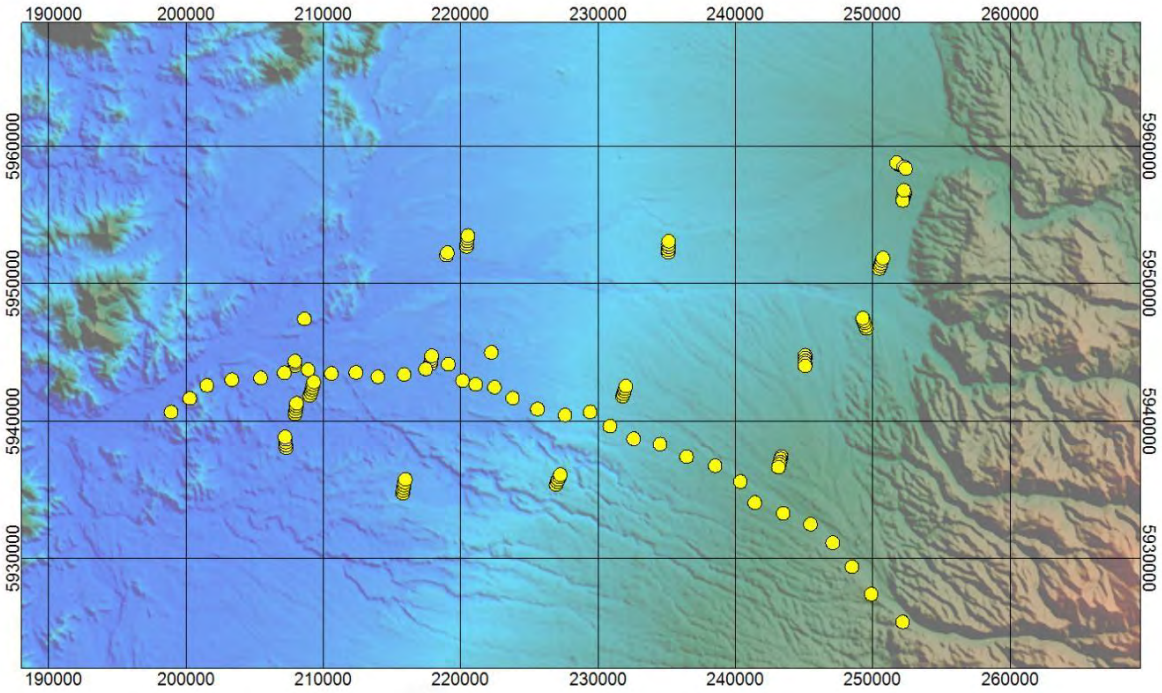


Figura Anexa 3. Ubicación de estaciones de gravedad en campaña gravimétrica de este proyecto.

3.2.1.3. Integración y proceso de datos de gravedad

En la Figura Anexa 4 se muestra la integración de las estaciones de gravedad medida. Para integrar los datos de gravedad en una superficie común se utilizaron los valores de gravedad absoluta, sin embargo se identificó una diferencia de 84,77 mGal entre ambas campañas valor que fue restado a los datos de la campaña previa y así fue posible obtener un mapa de gravedad absoluta consistente a ambos set de datos.

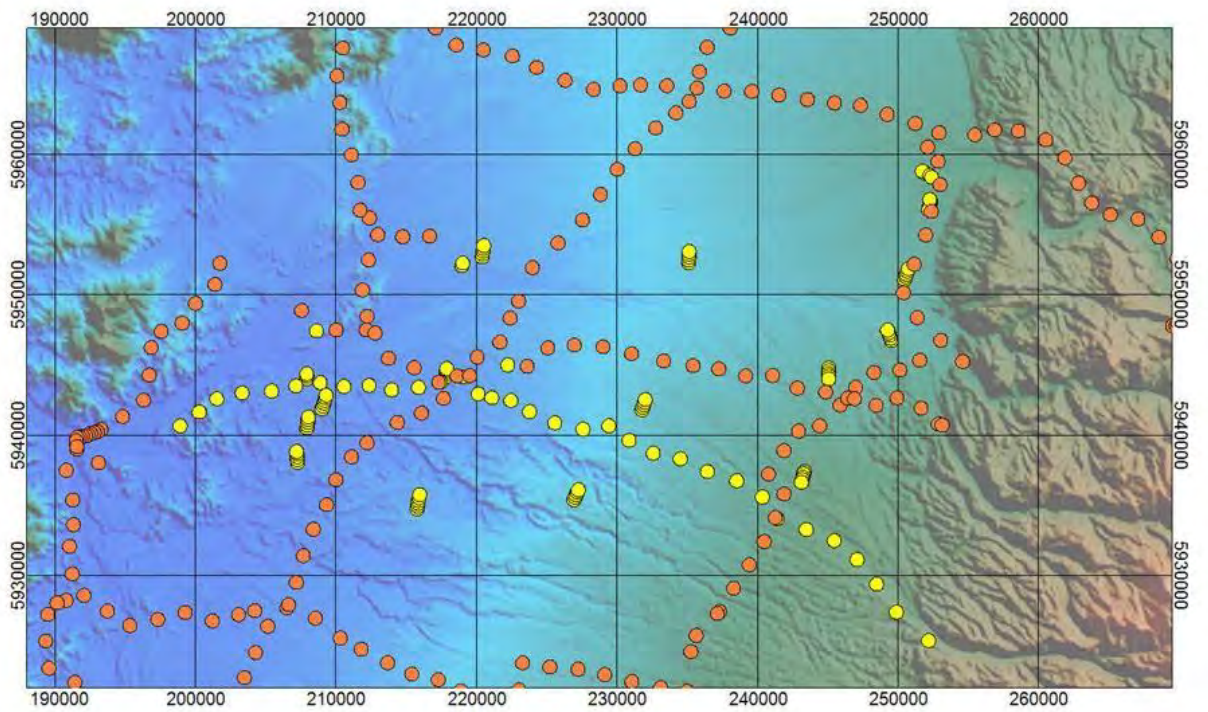


Figura Anexa 4. Integración de campañas de gravedad en círculos de color rojo campaña previa, en círculos amarillos levantamiento realizado en este proyecto. Nótese que el área de trabajo se ha reducido en relación a la superficie de medición de la campaña previa.

3.2.2. Reducción de datos

El proceso de los datos de DGPS se efectuó utilizando como estación base la estación de GPS continuo del Servicio Sismológico Nacional (SSN) ubicada en la ciudad de Chillán (estación CLL1: 72°4' 47.88379" O, 36°35' 42.31234" S, altura: 155,99m), con un "base-line" inferior a 10 km con respecto a los puntos de medición de GPS/Gravedad. Los puntos de GPS de campo se midieron durante ventanas de tiempo de 6 minutos, asegurando de este modo, en conjunto con la distancia a la base inferior a 10 km, errores de cota por debajo de 10 cm. El proceso de los datos se efectuó mediante el software Trimble Bussines Center.

El proceso conjunto de los datos incluyo las siguientes etapas:

- Corrección de Aire Libre: + h (elevación) * 0,3086.
- Corrección de Bouguer: - h * 0,04192 * 2,65 (densidad media de la corteza somera en gr/cc).
- Gravedad teórica (modelo WGS84):

G_{teo}=978032,67714*(1+0,00193185138639*sin(lat*0,0174533)*sin(lat*0,0174533))/sqrt(1-0,00669437999013*sin(lat*0,0174533)*sin(lat*0,0174533)).

- Corrección topográfica: Corrección mediante aplicación de Oasis-Montaj: Terrain Correction. En esta aplicación se utiliza un modelo digital de terreno de 30m de resolución. La cota utilizada para esta corrección corresponde a la cota interpolada a cada punto de observación, de esta forma se utiliza una base de referencia común a todos los datos y se evita errores asociados a diferencias de cota entre el modelo digital de terreno y la cota medida en cada observación. El modelo digital de terreno utilizado para esta corrección se presenta en Figura Anexa 5. Se puede apreciar que la distancia de corrección es superior a 80 km de distancia con respecto a los puntos de medición, y en consecuencia se asegura que los efectos de masas lejanas han quedado bien representados.

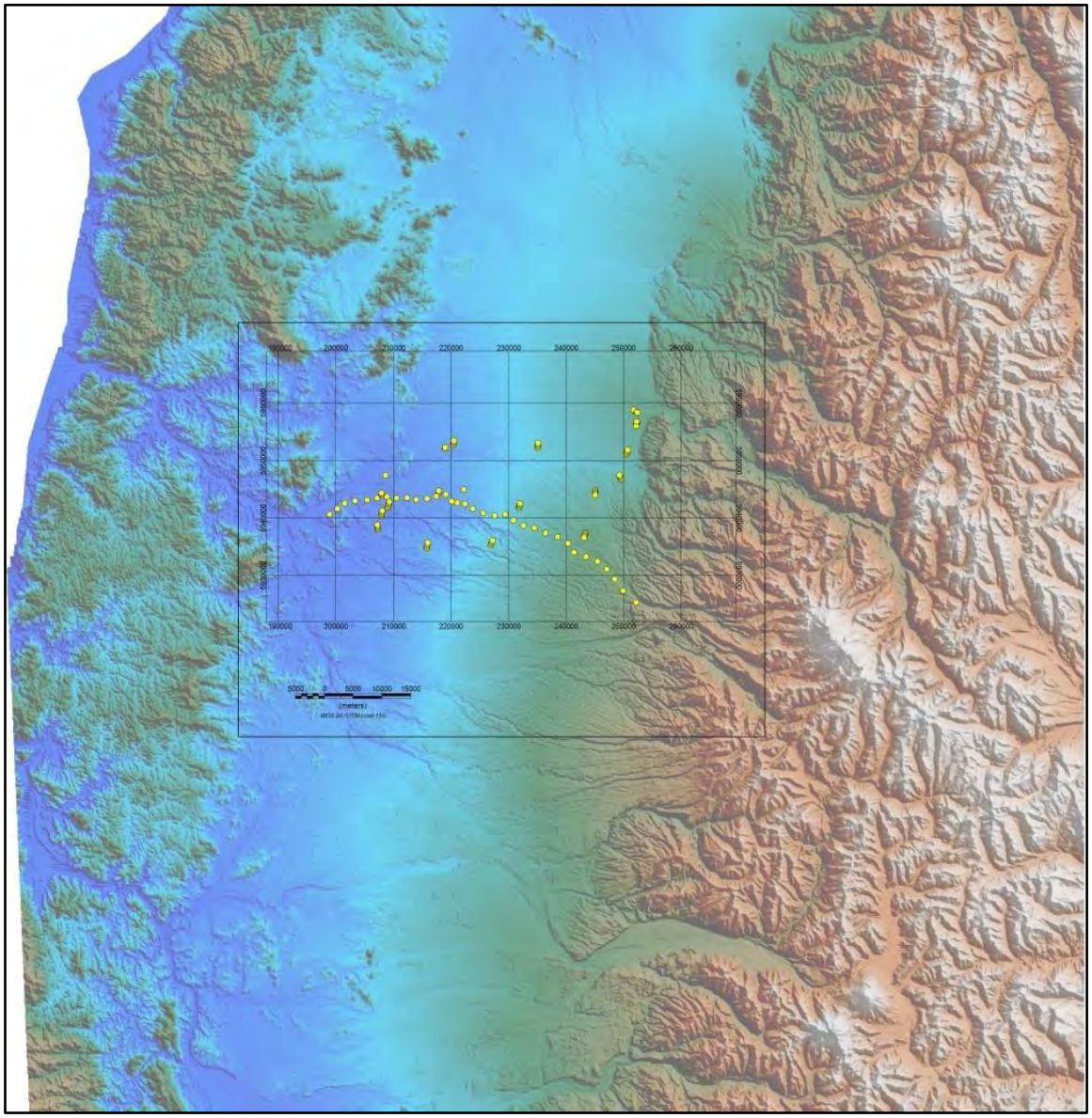


Figura Anexa 5. Modelo digital de terreno utilizado para la corrección topográfica.

El error del estudio de gravedad está condicionado por el error de cota y de lectura del gravímetro. El error de cota es del orden de 5 cm, lo cual implica un error de gravedad de 0,015 mGal. El error de observación de gravedad fue de 0,060 mGal, como producto de vibraciones (mediciones en caminos y viento). No hay reportes de errores en el estudio de gravedad previo en lo que respecta a la medición de gravedad, si bien es esperable que la medición de cota fuese equivalente dado que se efectuó con GPS diferencial. En primera aproximación se considera que el presente estudio es de mejor calidad en relación a la medición de gravedad ya que se efectuó con instrumento de última generación que realiza una estadística de más de 120 medidas por punto, en contraste con la medición (analógica) efectuada por un gravímetro Lacoste & Romberg de más de

20 años, y si posibilidad de llevar a cabo una buena estadística. En consecuencia el error de la integración de los resultados está condicionado por el error de la medición de gravedad previa, que debe ser superior a 0,060 mGal. Se estima que un valor conservador es 0,100 mGal, lo cual implica errores en la estimación de espesores sedimentarios del orden de 4-5m, lo cual es aceptable para mediciones de gravedad en ambientes de cuencas sedimentarias. La anomalía de Bouguer resultante del proceso integrado de datos se presenta en Figura Anexa 6.

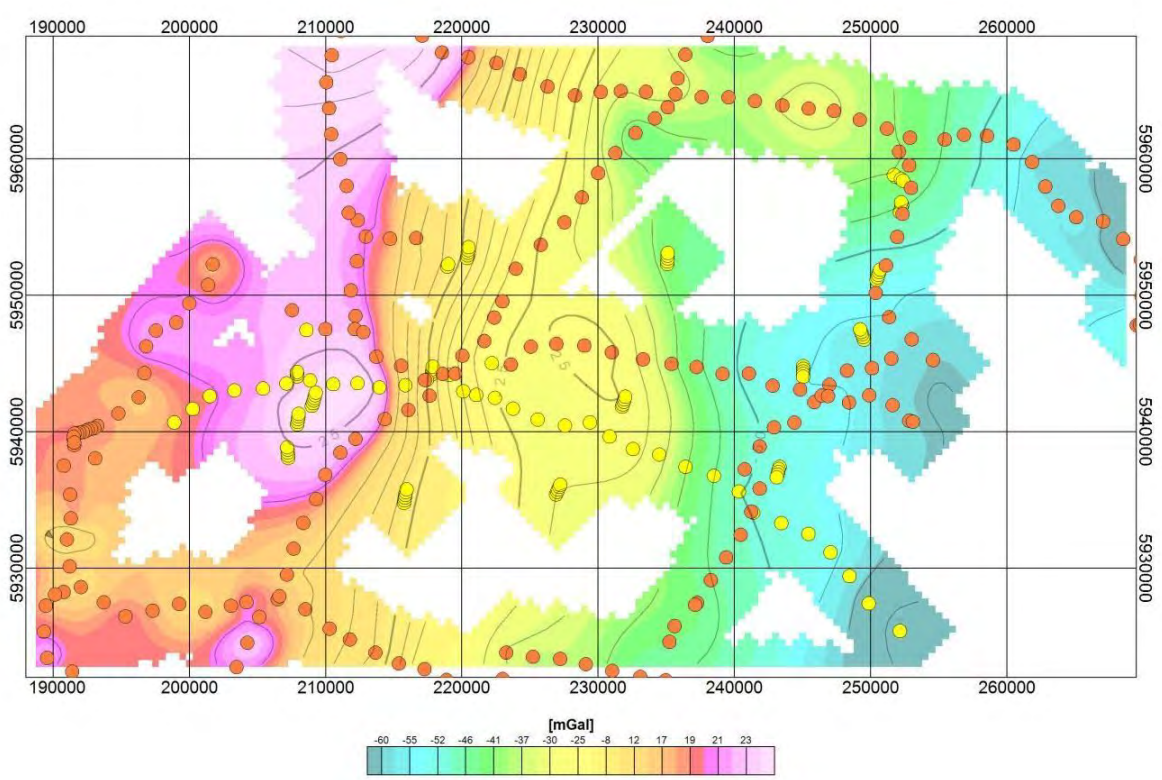


Figura Anexa 6. Anomalía de Bouguer. Símbolos de color rojo corresponden a la información previa y los símbolos de color amarillo a los datos del presente estudio.

3.2.3. Modelamiento

3.2.3.1. Estimación de regional

En la Figura Anexa 5 se ha presentado el mapa de anomalía de Bouguer del área de estudio. En este mapa se aprecia el efecto de un plano regional asociado a la raíz de la Cordillera de los Andes (negativo hacia el E). A fin de eliminar este efecto se modela el efecto de esta raíz cortical mediante un modelo isostático-flexural de compensación de la Cordillera Andina. Para el cálculo de la gravedad compensada en modo isostático-flexural se utiliza un espesor elástico de 20 km que es apropiado para esta zona del país (Tassara & Yáñez, 2003). En Figura Anexa 7 se presenta la anomalía de gravedad asociada a este modelo de compensación isotático-flexural.

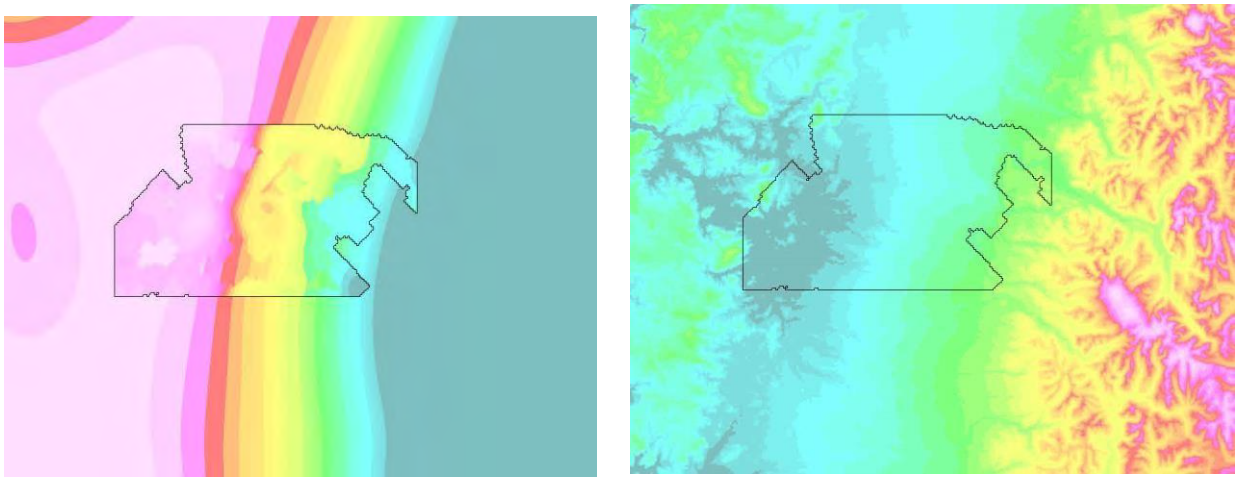


Figura Anexa 7. Modelo de gravedad isostático-flexural del área de estudio (panel izquierdo). En Panel de la derecha el modelo digital de terreno utilizado para este cálculo. En perímetro de color negro el área de estudio. Adicionalmente en panel izquierdo se superpone la anomalía de Bouguer para contrastar con el modelo isostático-flexural.

En la Figura Anexa 8 (arriba) se presenta la anomalía de Bouguer Residual derivada de la resta de la anomalía de Bouguer y el modelo de gravedad regional isostático-flexural.

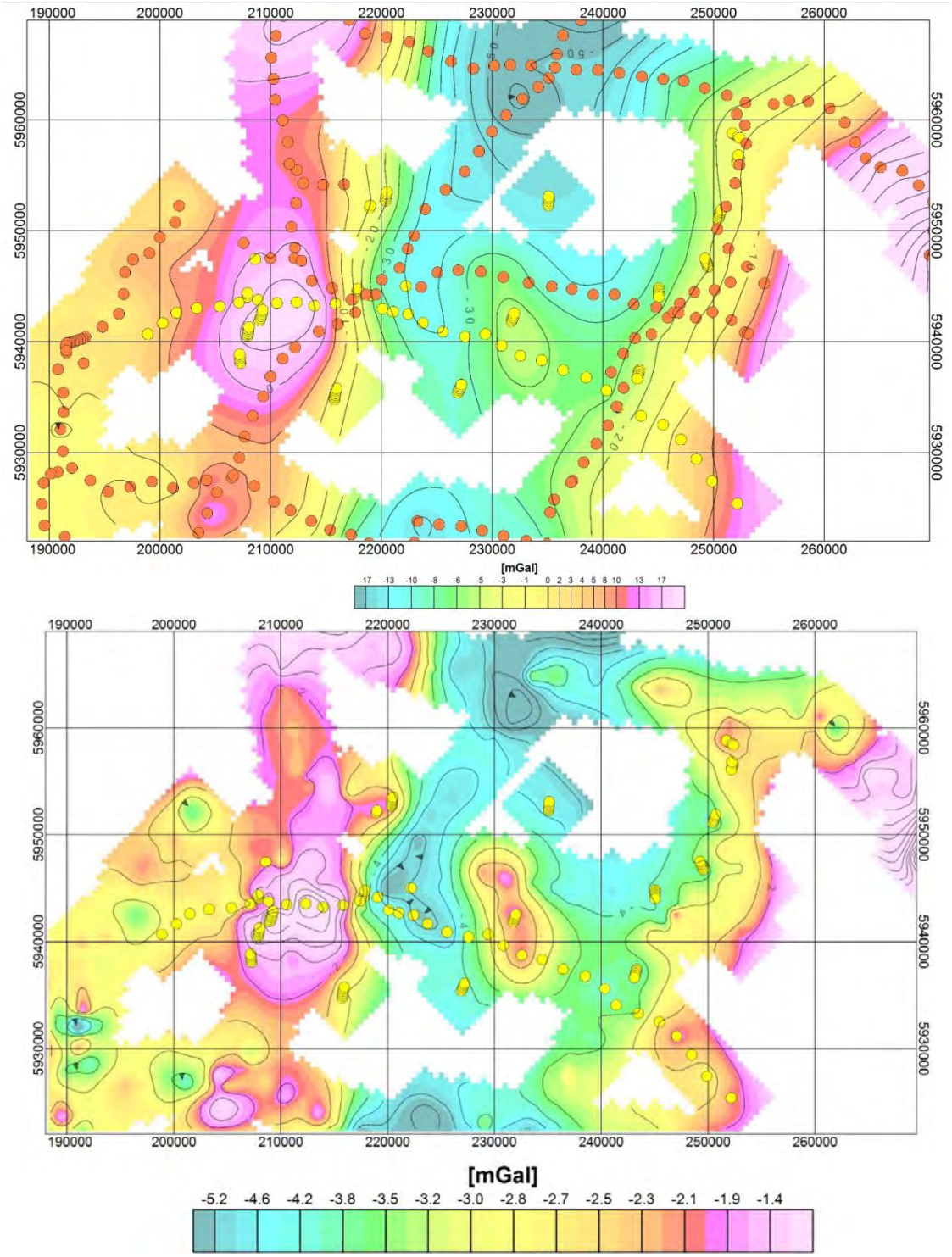


Figura Anexa 8. Anomalía de Bouguer Residual (arriba). Anomalía de Bouguer Residual calibrada con la gravimetría (abajo).

La Figura Anexa 8 (abajo) muestra el residual final que ha resultado de calibrar la gravimetría con los TEM y eliminar una tendencia regional de segundo orden que da cuenta de las heterogeneidades en el basamento.

3.2.3.2. Modelación 2D

El plano de Anomalía Residual de la Figura Anexa 8 muestra con claridad la presencia de un dominio de cuenca sedimentaria en la parte central del área de estudio.

Con el objeto de disponer de una primera estimación de las profundidades al basamento, se efectuó un modelo de inversión de la gravedad para el relleno de la cuenca de baja densidad y que se pudo calibrar aceptablemente bien con los TEM que alcanzaron a detectar un contraste con un medio más compacto e impermeable. Bajo estas condiciones los espesores no superan los 500m en casi toda el área de trabajo. Para este trabajo se efectuaron modelos 2D en perfiles específicos, mediante el programa de modelación ModelVisión los que modelan la gravedad residual de Figura Anexa 8 (arriba). Sin embargo en esta modelación preliminar, resultan espesores muy grandes, por lo que se procedió a generar otro residual teniendo en consideración los resultados TEM. Este nuevo residual mostrado en la Figura Anexa 8 (abajo), define un basamento impermeable, una mezcla de roca y relleno muy compactado, por esa razón se determina el residual que resulta de restar una continuación hacia arriba del residual 1 (continuación a 1000m).

Para la modelación se consideró una densidad de basamento de 2,30 gr/cc y una densidad constante del relleno sedimentario de 1,80 gr/cc, lo que resulta en un contraste de densidad de 0,5 gr/cc. (Figura Anexa 9)

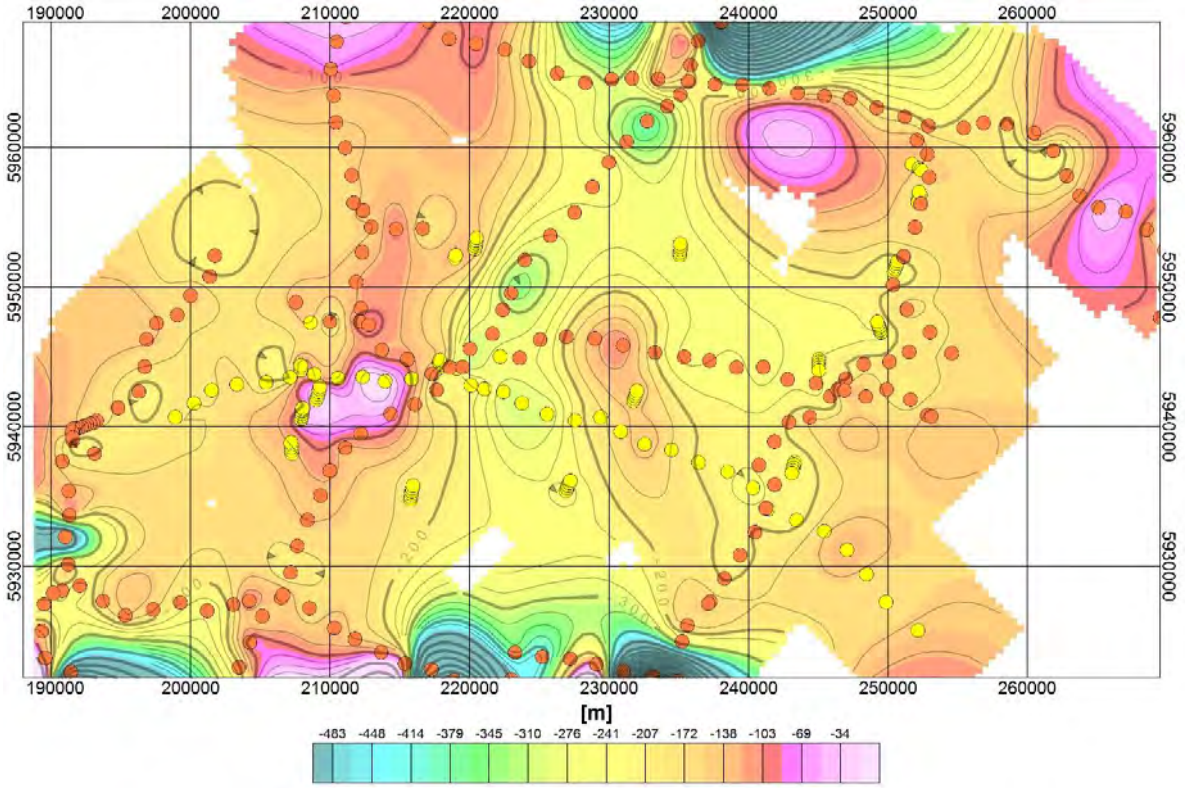


Figura Anexa 9. Modelo de inversión de gravedad para el relleno de la cuenca de baja densidad calibrado con los resultados de los TEM.

4. INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS RESULTADOS

La información de pozos está ampliamente distribuida a lo largo y ancho del área de estudio. La Figura Anexa 1, muestra la ubicación de los pozos y perfiles con información relevante desde el punto de vista estratigráfico. A continuación se describe una interpretación hidrogeológica de los resultados del estudio geofísico realizado en coherencia con la información geológica y de pozos disponible.

Combinando la información estratigráfica e hidrogeológica es posible establecer la siguiente síntesis.

- Zona no saturada y /o parte superior del acuífero: capa más superficial, en todas las líneas estudiadas, con un espesor de aproximadamente 40 m e y valores de resistividad de 30 a 400 ohm-m, que no conviene interpretarla directamente a partir de estos valores de resistividad, dado que el método TEM con un loop de 200x200 m no es capaza de resolver eficientemente los primeros 40 m. Sin embargo, de acuerdo a los datos de los pozos se puede interpretar interpretados

como contenidos variables de por grava, arcillas y arena, los cuales presentan diversos grados de saturación dependiendo de la localización del nivel estático y la permeabilidad.

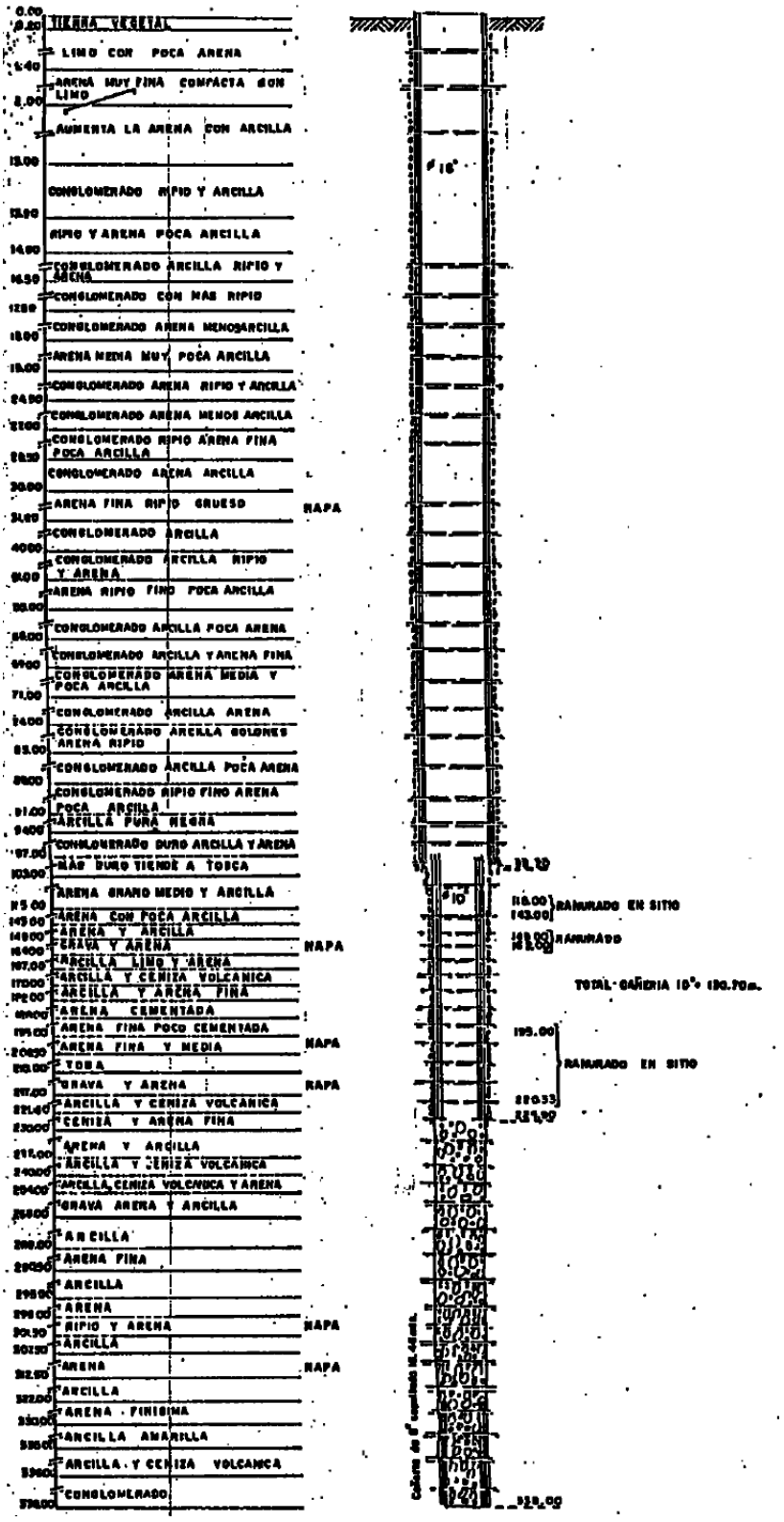
- Acuífero. Capa con valores de resistividad, predominantemente entre 5 y 60 ohm-m conformada por contenidos variables de clastos, arena y arcillas. Cuando en este nivel predominan bajos valores de resistividad, es factible esperar que predominen las arcillas y por ello cuando éste nivel se encuentra por sobre el nivel más permeable asociado a valores de resistividad mayores, es factible de esperar cierto grado de confinamiento del acuífero principal.

- Basamento impermeable: Esta capa se interpreta como impermeable a partir de valores de resistividad mayores que 500 Ohm-m (Perfiles TE 11, 13,14, 15) y como resultado de la modelación gravimétrica, alcanzando profundidades del orden de hasta 500 m (Figura Anexa 9).

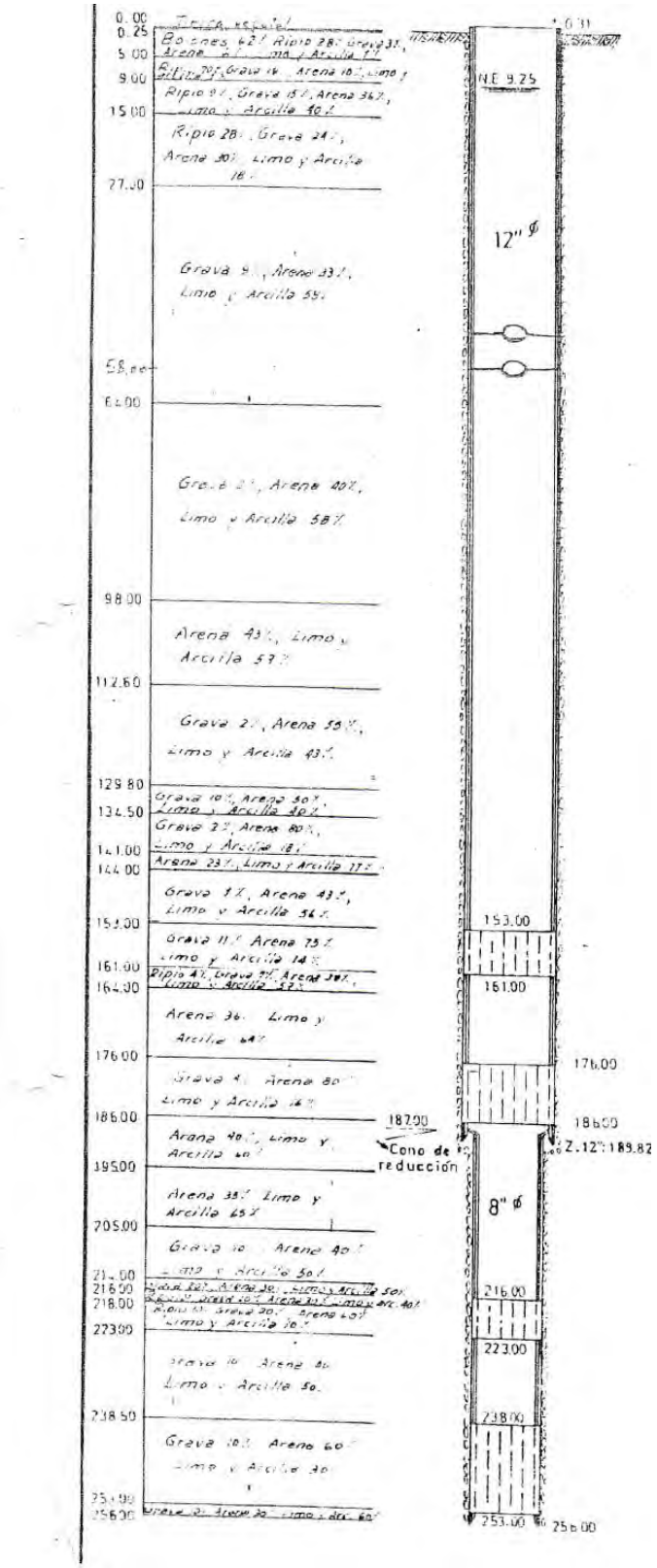
La interpretación hidrogeológica aquí mencionada y los espesores deducidos de las interpretaciones geofísicas aquí realizadas corresponden a una aproximación que deben ser ajustadas de acuerdo a la información estratigráfica de los pozos profundos construidos y a construir en la cuenca. Las complejidades asociadas a las características estratigráficas del relleno sedimentario de la cuenca y la permeabilidad de las unidades más profundas son un desafío que se recomienda sea materia de estudios y análisis adicionales. En CIREN CORFO se detectó la existencia de al menos 13 pozos adicionales con profundidades relevantes que podrán aportar mayores antecedentes para estas interpretaciones. Sin embargo, para este estudio no fue posible obtener esta información.

Un ejemplo de lo descrito anteriormente se desprende de las descripciones estratigráficas detectadas a partir de los expedientes de pozos DGA en los dos pozos más profundos detectados a partir de esta fuente de información (expedientes DGA ND-0801-1639 y NR-0801-866). De esta forma, estos pozos (ver perfil estratigráfico de pozos más adelante) presentan una serie de intercalaciones con niveles de espesores métricos de sedimentos finos (limos, arcillas y en algunos casos ceniza) y sedimentos más gruesos (grava y arena), algunos con gran contenido de limo y arcilla, con diversos grado de confinamiento y hasta ~330 m de profundidad en el Pozo ND-0801-1639 localizado a 8-9 km al este de Chillán y hasta 256 m de profundidad en el Pozo NR-0801-866 localizado inmediatamente en el extremo norte de Chillán.

Estratigrafía Pozo Expediente ND-0801-1639 (5.945.298 N, 768.069 E PSAD56, Huso 18)



Estratigrafía Pozo Expediente NR-0801-866 (5.948.109 N, 759.389 E, PSAD56 Huso 18).



ANEXO N°2. RESPALDO DIGITAL